

**TEOLLISUUDEN SIVUTUOTTEIDEN KÄYTÖN
MAHDOLLISUUDET VILJELTYJEN TURVEMAIKEN
MAANPARANNUKSESSA**

Ilona Kerovuori

Maisterintutkielma

Maaperä- ja ympäristötiede

Helsingin yliopisto

Maataloustieteiden osasto

Lokakuu 2020

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty		Osasto — Sektion — Department	
Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Maataloustieteiden osasto	
Tekijä — Författare — Author			
Ilona Kerovuori			
Työn nimi — Arbetets titel — Title			
Teollisuuden sivutuotteiden käytön mahdollisuudet viljeltyjen turvemaiden maanparannuksessa			
Oppiaine — Läroämne — Subject			
Maaperä- ja ympäristötiede			
Työn laji — Arbetets art — Level		Aika — Datum — Month and year	
Maisterintutkielma		12.10.2020	
		Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages	
		71 s.	
Tiivistelmä – Referent – Abstract			
<p>Viljeltyjen turvemaiden keskeisimpiä ongelmia ovat niiden heikko kantavuus, korkeat kasvihuonekaasupäästöt, kylmyys ja happamuus. Teollisuuden sivutuotteina saatavien maanparannusaineiden käytöstä turvemilla on hyvin vähän tutkittua tietoa. Tämän maisterintutkielman tarkoituksena oli tutkia teollisuuden sivutuotteena saatavien maanparannusaineina käytettävien kuitusaven ja kipsisakan vaikutuksia maan rakenteen kestävyys, kasvihuonekaasujen (CO₂ ja N₂O) tuotantoon sekä maan lämpö- ja kaasutalouteen turvemilla.</p> <p>Tutkimus tehtiin laboratoriossa kenttäkokeelta otetuista näytteistä. Koejäsenenä oli lannoittamaton, kontrolli, kipsisakka 3 kg m⁻², kuitusavi 3 kg m⁻², kuitusavi 15 kg m⁻² sekä kuitusavi 15 kg m⁻² + kipsisakka 3 kg m⁻². Maan murujen vedenkestävyys määritettiin märkäseulonnalla silmäkooltaan 0,25 mm ja 2 mm seuloilla kolmessa eri kosteudessa. Maan kasvihuonekaasujen tuotto määritettiin kaasukromatografisesti kenttäkapasiteettikosteudessa. Maan lämpöominaisuudet määritettiin mittaamalla maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti kenttäkapasiteetissa ja kyllästyneenä. Lisäksi mitattiin maan pH, kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus ja vedenpidätyskapasiteetti matriisipotentiaaleissa pF 0; 0,4; 1; 2 ja 4,2.</p> <p>Maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta maan murujen vedenkestävyyteen kenttäkosteudessa. Maan CO₂-tuotto kasvoi kuitusavikäsittelyillä ja väheni kipsisakkakäsittelyllä. Yksittäisillä maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta maan N₂O-tuottoon, mutta kuitusaven ja kipsisakan yhteisvaikutuksella N₂O-tuotto kasvoi. Maan CH₄-kulutus laski kipsisakkakäsittelyllä. Maanparannusainekäsittelyillä ei ollut vaikutusta maan lämmönjohtavuuteen tai lämmön diffusiviteettiin kenttäkapasiteettikosteudessa. Veden kyllästämissä näytteissä sen sijaan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti kasvoivat kuitusaven ja kipsisakan yhteisvaikutuksesta. Toisin kuin kipsisakalla, kuitusavella havaittiin olevan selkeä kalkitusvaikutus. Maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta kyllästyneen maan hydrauliseen vedenjohtavuuteen tai vedenpidätyskapasiteettiin missään matriisipotentiaalissa. Tulosten perusteella käytetyillä maanparannusaineilla ei ollut suurta vaikutusta turvemilla esiintyviin viljelyongelmiin, mutta lisätutkimus niiden maanparannuskäytöstä turvemilla on tarpeen.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords			
Kuitusavi, kipsisakka, maanparannus, turvemaa, maaperä			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited			
E-thesis -tietokanta			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information			
Ohjaaja: Asko Simojoki			

Tiedekunta/Osasto — Fakultet/Sektion — Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Osasto — Sektion — Department Department of Agricultural Sciences	
Tekijä — Författare — Author Ilona Kerovuori			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Possibilities of using industrial by-products as soil amendments in cultivated peatlands			
Oppiaine — Läroämne — Subject Environmental Soil Science			
Työn laji — Arbetets art — Level M.Sc. Thesis	Aika — Datum — Month and year 12 October 2020	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 71 p.	
<p>Tiivistelmä – Referent - Abstract</p> <p>The main problems with cultivated peat soil are its weak carrying capacity, high greenhouse gas emissions, coldness, and acidity. There is very little research on using industrial by-products as soil amendments in peat soil. The aim of this thesis was to study the effects of industrial by-products paper mill sludge and gypsum on the sustainability of soil structure, greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions and soils heat and gas dynamics in peat soil.</p> <p>The study was performed in the laboratory on samples taken from a field test. The tested treatments were unfertilized, control, gypsum 3 kg m⁻², paper mill sludge 3 kg m⁻², paper mill sludge 15 kg m⁻² and paper mill sludge 15 kg m⁻² + gypsum 3 kg m⁻². The water-stable aggregates were determined by wet sieving with 0.25 mm mesh and 2 mm mesh at three different moisture contents. The greenhouse gas emissions of the soil were determined by gas chromatography at field capacity. The thermal properties of the soil were determined by measuring the thermal conductivity and diffusivity of the soil at field capacity and at saturation. In addition, soil pH, hydraulic conductivity of saturated soil, and water-holding capacity at matrix potentials pF 0; 0.4; 1; 2 and 4.2 were measured.</p> <p>Soil amendments had no effect on the water-stable aggregates in field moisture. The soils CO₂ emissions increased with paper mill sludge treatments and decreased with gypsum treatment. Individual soil amendments had no effect on the N₂O emissions of the soil, but the combined effect of paper mill sludge and gypsum increased the N₂O emissions. The soils CH₄ consumption decreased with gypsum treatment. Soil amendment treatments had no effect on soil thermal conductivity or thermal diffusivity at field capacity. However, in water-saturated samples the thermal conductivity and heat diffusivity of the soil was increased by the combined effect of paper mill sludge and gypsum. Unlike gypsum, paper mill sludge was found to have a clear liming effect. Soil amendments had no effect on the hydraulic water conductivity or water-holding capacity of saturated soil at any matrix potential. Based on the results, the soil amendments used did not have a major impact on the cultivation problems in peat soil, but further research on their use as soil amendments is needed.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords Paper mill sludge, gypsum, soil amendment, peat soil, soil			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited E-thesis database			
Muita tietoja — Övriga uppgifter — Further information Supervisor: Asko Simojoki			

Sisällys

1 Johdanto	6
2 Turvemaat	7
2.1 Turvemaiden luokittelu ja turpeen koostumus.....	7
2.2 Turvemaiden viljelyominaisuudet.....	8
2.2.1 Turvemaiden rakenteen muodostuminen	8
2.2.2 Turvemaiden vesitalous	9
2.3 Viljeltyjen turvemaiden ongelmat.....	11
2.3.1 Yleistä viljeltyjen turvemaiden ongelmista.....	11
2.3.2 Maan märkyys ja maan painuminen	12
2.3.3 Kasvihuonekaasupäästöt	14
2.3.4 Roudan hidas sulaminen, hallanarkuus ja kylmyys	16
2.3.5 Happamuus.....	19
3 Maanparannus ja maanparannusaineet.....	20
3.1 Maanparannuksen tavoite ja keinot.....	20
3.2 Kuitusavi	21
3.3 Kipsisakka.....	22
4 Tutkimuksen tavoitteet ja työhypoteesit	24
5 Aineisto ja menetelmät.....	25
5.1 Koejärjestely, näytteenotto ja esikäsittely.....	25
5.2 Mittaus- ja analyysimenetelmät	27
5.2.1 Maamurujen vedenkestävyys	27
5.2.2 Kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus.....	27
5.2.3 Maan vedenpidätyskapasiteetti ja kuiva irtotiheys	28
5.2.4 Maanäytteiden kasvihuonekaasujen tuotto	30
5.2.5 Maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti	31

5.2.6 Maan pH ja sähkönjohtavuus	31
5.2.7 Maan hiilipitoisuus.....	32
5.3 Laadunvalvonta ja tilastolliset analyysit	32
6 Tulokset.....	33
6.1 Maamurujen vedenkestävyys ja kuiva irtotiheys	33
6.2 Maan hiilidioksidin, dityppioksidin ja metaanin tuotto	34
6.3 Maan lämpöominaisuudet	37
6.3 Vedenpidätyskapasiteetti ja kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus	39
6.4 Maan pH, johtoluku ja kokonaishiilipitoisuus	40
7 Tulosten tarkastelu	41
7.1 Maanparannusaineiden vaikutus turvemaan rakenteen kestävyys ja tiiviyyteen.....	42
7.2 Maanparannusaineiden vaikutukset maan kasvihuonekaasupäästöihin.....	45
7.3 Maanparannusaineiden vaikutukset maan lämpötalouteen.....	48
7.4 Maanparannusaineiden vaikutus maan vesitalousominaisuuksiin.....	49
7.5 Maanparannusaineiden vaikutukset maan happamuuteen	52
7.6 Tuloksiin vaikuttaneita tekijöitä.....	53
7.6.1 Poikkeavien havaintojen tarkastelu ja poisto	53
7.6.2 Maanparannusaineiden levitykseen liittyvät virhetekijät.....	54
7.6.3 Lierojen vaikutus rakennenäytteistä tehtyihin mittauksiin	56
8 Johtopäätökset.....	57
9 Kiitokset	58
10 Lähteet.....	58

1 Johdanto

”Alussa olivat suo, kuokka – ja Jussi” (Linna 1959) alkaa kaikille tutuksi tullut klassikkoromaanisarja. Nuo sanat kuvaavat erittäin hyvin turvemaiden tärkeyttä Suomen maanviljelyksen historiassa, sillä soita on alettu ojittaa ja kuivata viljelykäyttöön jo 1600-luvulta lähtien (Kivinen 1950; Myllys 1998). Suomessa on turvemaita noin 10,4 miljoonaa hehtaaria, mistä noin 10 % kuivatettu maatalouskäyttöön. Suurin osa turvemaiden kuivattamisesta viljelykäyttöön on tehty 1900-luvulla ja etenkin toisen maailmansodan aikoihin (Nykänen ym. 1995). Turvemaista tällä hetkellä aktiivisessa maatalouskäytössä on noin 300 000 hehtaaria (Myllys ja Sinkkonen 2004) ja turvetuotannossa noin 60 000 hehtaaria (Hotanen 2016).

Turvetuotantoon kuivatetulta alueelta nostetaan turvetta noin 15 - 30 vuotta, minkä jälkeen alue siirtyy esimerkiksi metsä- tai maatalouskäyttöön (Iivonen 2008). Kuitenkin arviolta vain 25 % turvetuotannosta poistuneista suopohjista soveltuu viljelykäyttöön (Iivonen 2008). Viljelykäyttöönottoon ja turvemaan käyttökelpoisuuteen vaikuttavat suopohjan pohjamaan kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet, turpeen paksuus ja sen laatu (Iivonen 2008), alueen sijainti ja perustamisen mahdolliset korkeat kustannukset (Virkajärvi ja Huhta 1998). Lisäksi turvemaiden viljelyä hankaloittaa muun muassa niiden märkyys, kylmyys, happamuus ja vähäravinteisuus, mutta ongelmana myös korkeat kasvihuonekaasupäästöt. Kuitenkin turvemaiden viljelyominaisuuksia on mahdollista parantaa erilaisin keinoin. Kivennäismaata on käytetty maan viljelyominaisuuksien parantamiseen jo 1700-luvulta (Myllys ja Soini 2008), mutta nykyään sen käyttö on kuitenkin harvinaista (Myllys 1998).

Vuosittain puuteollisuuden sivuotteina hyvin suuria määriä kuitupitoisia jätteitä. Esimerkiksi vuonna 2013 niitä syntyi yli miljoona tonnia (Matilainen 2014). Aikaisemmin jätteet on joko poltettu tai loppusijoitettu kaatopaikoille (Matilainen 2014; Kuokkanen 2019). Vuonna 2012 uudistuneessa jätelaissa (VN 2011) korostetaan tuotannossa syntyvien jätteiden käyttämistä uudelleen. Lisäksi orgaanisen jätteen loppusijoitus kaatopaikoille on kielletty vuodesta 2016 lähtien (Ympäristöministeriö 2018.) Suomen hallitus onkin asettanut tavoitteeksi, että Suomi on kiertotalouden edelläkävijä vuoteen 2025 mennessä (Sitra 2016; Sitra 2019). Teollisuuden

sivutuotteina syntyvät kuitusavi ja kipsisakka ovat potentiaalisia maanparannusaineita, mutta niiden käytöstä turvemailla on saatavilla tutkimustietoa vain hyvin vähän.

Tämän maisteritutkielman tarkoituksena on tutkia teollisuuden sivutuotteena syntyvien kuitusaven ja kipsisakan vaikutuksia turvemaan rakenteen kestävyYTEEN, maan kasvihuonekaasujen muodostumiseen, maan lämpötalouteen sekä maan happamuuteen. Tutkielman kokeellinen osuus toteutettiin osana Helsingin yliopiston, Perunantutkimuslaitoksen ja Oulun yliopiston yhteistyössä tekemään projektia (Teollisuuden sivutuotteiden käyttömahdollisuudet turvetuotannosta poistuneiden suopohjien maanparannukseen non-food-perunantuotantoa varten). Hankkeen rahoituksen myönsi Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus, ja se oli osa vuoden 2016 Ravinteiden kierrätyksen kokeiluohjelmaa.

2 Turvemaat

2.1 Turvemaiden luokittelu ja turpeen koostumus

Geologisen määritelmän mukaan suot koostuvat turvekerrostumista ja niiden alla mahdollisesti olevista muta- tai liejuesiintymistä (Pessi 1966). Biologisen määritelmä mukaan suot ovat kasviyhdyskuntia, jotka hajotessaan tuottavat turvetta (Pessi 1966). Turpeeseen on sitoutunut yli 60 % Suomen hiilivarastosta (Larmola ym. 2014). Turve on eloperäinen maalaji, jota syntyy eri maatumisvaiheissa olevan kasviaineksen kerrostuessa liiallisesta märkyydestä, happamuudesta ja ravinteiden puutteesta koostuvilla alueilla. Turvemaat luokitellaan kuuluviksi eloperäisiin maihin, ja turvemaiksi luokitellaan alueet, joiden orgaanisen aineksen pitoisuus 40 % (Myllys 1998). Turpeen ominaisuudet vaihtelevat kasviaineksen, turpeeseen sekoittuneen mineraaliaineksen, ja turpeen maatumisasteen mukaan (Kasimir-Klemedtsson ym. 1997). Kemialliselta koostumukseltaan turpeen orgaaninen aines sisältää muun muassa selluloosaa, hemiselluloosaa, ligniinejä, vahoja, proteiineja ja hartseja (Virtanen ym. 2003).

2.2 Turvemaiden viljelyominaisuudet

2.2.1 Turvemaiden rakenteen muodostuminen

Maan rakenne eli struktuuri on fysikaalinen käsite, joka kuvaa sitä, miten maahiukkaset ovat järjestäytyneet keskenään sekä kiinteän aineksen väliin jäävän huokoston ominaisuuksia, kuten esimerkiksi kokonaistilavuutta, jatkuvuutta ja kokojakaumaa (Hillel 2004). Maan rakenne on myös kvalitatiivinen käsite, joka kuvaa minkälaista maa on, kuten esimerkiksi yksihiukkeista, massiivista, kuohkeaa tai muruista (Hillel 2004). Maan rakenne on yksi tärkeimmistä tekijöistä maaperän toimintojen säilyttämisessä ja ylläpitämisessä (Hanke ja Dick 2017). Maan hyvä rakenne on olennainen osa maan vesi- kaasu- ja lämpötaloutta sekä ravinteiden kulkeutumista, hiilen sidontaa, kasvien ja maan mikrobien kasvua, sekä eroosion ehkäisyä (Passioura 1991; Deneff ym. 2001; Bronick ja Lal 2005; Madari ym. 2005; Ball 2013). Maan rakenne vaihtelee maankäytön, biologisen aktiivisuuden ja ilmaston mukaan (Hillel 2004).

Maan rakenne koostuu primäärihiukkasista ja niiden yhteenliittymistä eli muruista, sekä primäärihiukkasten ja murujen väliin jäävästä huokostosta. Maan huokokset jaotellaan niiden halkaisijan mukaan pieniin ($\varnothing < 0,0002$ mm), keskiisuuriin ($\varnothing 0,0002 - 0,03$ mm) ja suuriin huokosiin ($\varnothing > 0,03$ mm). Maan huokokset ovat joko veden tai ilman täyttämiä riippuen maan kosteuspitoisuudesta. Huokokset toimivat veden varastona ja aineiden kuljetusreitteinä, mutta myös kasvienjuurten, maaeläinten ja mikrobien kasvupaikkoina (Hillel 2004; Alakukku 2016).

Orgaanisilla mailla maa-aines koostuu pääasiallisesti hajoamisvaiheessa olevista kasvinosista, ja rakenteen muodostuminen ei ole yhtä selvää kuin kivennäismailla, joilla flokkulaation seurauksena primäärihiukkaset muodostavat mikromuruja, ja mikromurujen yhteenliittyminen edelleen makromuruja. Kuten kivennäismailla, myös turvemaiden maan kuivuminen on oleellinen osa kestävästä mururakenteen muodostumisesta. Kuivuessaan turpeen ympärillä oleva vesifilmi kutistuu, jolloin turvehiukkaset pääsevät lähemmäksi toisiaan (Okrusko 1993), ja takertuvat toisiinsa elektrostaattisten voimien vaikutuksesta. Vesifilmin pienentyessä turve kutistuu, mutta samalla maan rakenteessa tapahtuu muutoksia, jolloin turpeen uudelleen kostuessa muodostuneet turvemurut eivät enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa (Okrusko 1993). Kuivuessaan turvemuruista tulee kokonaan

tai osittain hydrofobisia (Michel ym. 1999; Caron ja Rivière 2003). Toistuvien kuivumiskostumissykliä seurauksena muodostuu kestäviä muruja (Ilnicki 2003). Okruszko (1993) alkoi käyttää muruisesta turpeesta termiä ”moorsh”, koska termi kuvailee sen muodostumistapaa (moorsh-forming process). Syntyneitä muruja lujittaa muun muassa kasvien juurista erittyvät ja mikrobitoiminnasta syntyvät liima-aineet, sekä sieni ja juuririhmat.

2.2.2 Turvemaiden vesitalous

Maan vesitalousominaisuudet vaikuttavat maaperässä muun muassa aineiden liikkumiseen, maan viljelyominaisuuksiin, maan lämpötalouteen, kasvien kasvuun sekä eroosioon. Veden varastoitumiseen ja sen liikkumiseen maassa vaikuttavat maan lajitekoostumus eli tekstuuri, maan rakenne eli struktuuri sekä orgaanisilla mailla orgaanisen aineksen maatuneisuus. Vesi liikkuu ja varastoituu maaperässä oleviin huokosiin.

Maan vedenjohtavuus kuvaa maan vedenläpäisevyyttä (Kesäniemi 2009). Veden yksisuuntaista virtausta maassa kuvataan Darcyn lailla (Kaava 1, Hillel 2004):

$$q = -K \frac{\Delta H}{L}, \quad (1)$$

jossa

q = virtausnopeus (m s^{-1})

K = hydraulinen vedenjohtavuus (m s^{-1})

$\Delta H/L$ = hydraulinen gradientti

Darcyn laki on pätevä silloin, kun veden virtauksen oletetaan olevan laminaarista ja isotrooppista eli samanlaista kaikkiin suuntiin, ja maan homogeenista (Hillel 2004). Kuitenkaan edellä mainitut kriteerit eivät useimmissa tapauksissa päde maaperässä, jonka takia veden virtausta voidaan esittää tarkemmin kolmiulotteisena vektoriyhtälönä (Kaava 2, Marshall ym. 1996; Hillel 2004):

$$q = -K \nabla H, \quad (2)$$

jossa

$$\nabla H = i(\partial/\partial x) + j(\partial/\partial y) + k(\partial/\partial z).$$

Hydraulinen vedenjohtavuus (K) on suure, joka riippuu maan rakenteesta eli huokosten koosta, muodosta ja niiden jatkuvuudesta sekä maan vesipitoisuudesta ja veden ominaisuuksista. Pienissä ja mutkaisissa huokosissa veden liikkuminen on hitaampaa kuin suurissa ja suorissa huokosissa (Hillel 2004). Vedenjohtavuutta kuvataan kaavalla (Kaava 3, Hillel 2004):

$$K = \frac{k\rho g}{\eta}, \quad (3)$$

jossa

K = vedenjohtavuus (m s^{-1})

k = maan läpäisevyys (eli permeabiliteetti, m^2)

g = maan vetovoimasta aiheutuva putoamiskiihtyvyyden voima ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

ρ = veden tiheys (kg m^{-3})

η = veden viskositeetti ($\text{Pa s} = \text{Ns m}^{-2} = \text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

Hydraulista vedenjohtavuutta veden kyllästämässä maassa voidaan mitata laboratoriossa joko vakio painekorkeusmenetelmällä (karkeat maat) tai muuttuvalla painekorkeusmenetelmällä (hienojakoiset maat) (Vakkilainen 2016, s.104). Tässä tutkimuksessa käytettävässä vakio painekorkeusmenetelmässä mitataan tietyssä ajassa näytteen läpi tuleva vesimäärä.

Turvemailla turpeen maatumisaste vaikuttaa oleellisesti hydrauliseen vedenjohtavuuteen. Maatumisasteen kasvaessa maan irtotiheys kasvaa ja huokosten koko pienenee (Boelter 1969, Päivänen 1973), jolloin maan hydraulinen vedenjohtavuus laskee (Sarasto 1963; Boelter 1969; Myllys 1998). Myös eri turvelajien vedenjohtavuudet poikkeavat toisistaan. Saraturpeiden vedenjohtavuus on rahkaturpeita suurempi, ja puuturpeiden vedenjohtavuus on kaikkein korkein (Päivänen 1973; Myllys 1998). Turvemaiden vedenjohtavuus vaihtelee $0,0072 \text{ cm h}^{-1}$ - 36 cm h^{-1} (Päivänen 1973; Letts ym. 2010). Turvealueiden kuivatus pienentää maan vedenjohtavuutta, tiivistymisen seurauksena (Ilnicki ja Zeitz 2003). Turvetuotantoa varten kuivatetuilla alueilla vedenjohtavuudeksi on mitattu $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$, kun taas viljelykäyttöön otetun turvealueen, jota oli kuivatettu enemmän, vedenjohtavuus oli kymmenesosa tästä (Mustamo ym. 2016).

Yhtenä turvemaiden tärkeimmistä ominaisuuksista pidetään niiden kykyä pidättää vettä. Vesi pidättyy maahan adsorptiovedeksi maahiukkasten pinnoille sähköstaattisesti (ns. pienet huokokset $\varnothing < 0,0002 \text{ mm}$) sekä kapillaarisesti veden pintajännityksen vaikutuksesta maan huokosiin (keskisuuret $\varnothing 0,0002 - 0,03 \text{ mm}$ ja suuret huokokset $\varnothing > 0,03 \text{ mm}$). Maaveden sisältäessä liuenneita aineita, se voi pidättyä niihin myös osmoottisesti, jos vesi ja liuenneet eivät pääse liikkumaan maassa yhtä vapaasti

tai esimerkiksi puoliläpäisevän solukalvon läpi sisälle juuren soluun. Maan vedenpidätyskyky riippuu maan huokoskokojakaumasta, joka turvemaissa puolestaan riippuu erityisesti maan orgaanisen aineksen määrästä ja laadusta sekä maan tekstuurista. Maan vedenpidätyksen voimakkuutta kuvataan pF-arvolla, joka määritetään kohdistamalla vedenkyllästämään maanäytteeseen tietyn suuruinen alipaine tai ylipaine. Paineen kasvaessa maan huokokset tyhjenevät suurista huokosista pienimpiin. Maan vedenpidätyskykyä kuvaava pF-arvo voidaan laskea hydraulisena putouskorkeutena (cm vesipatsasta) ilmoitetun alipaineen kymmenkantaisena logaritmina. Turvemaiden vedenpidätys tehostuu maatumisasteen kasvaessa (Boelter 1969; Päivänen 1982). Tällöin maan irtotiheys kasvaa ja huokoskoko pienenee. Pieniin huokosiin vesi pidättyy voimakkaammin kuin suuriin huokosiin. Kyllästyneen maan vesipitoisuus on kuitenkin pienempi pitkälle hajonneessa turpeessa kuin vähän maatuneessa (Myllys 1998), sillä maatuneen turpeen huokokset ovat pienempiä ja huokostilavuus maassa on pienempi. Niin ikään turpeen säikeisyys vaikuttaa turpeen vedenpidätykseen. Kyllästyneessä maassa vesi pidättyy sitä tehokkaammin mitä säikeisempää turve on, mutta jo viiden senttimetrin imussa (cm v.p. = pF 0,7) turpeen säikeisyyden lisääntyessä sen vedenpidätyskyky laskee (Boelter 1969). Turvemaat pidättävät vettä kyllästyneenä 82 - 95 til-%, kenttäkapasiteetissa (-100 cm vesipatsasta) 25 - 72 til-% ja lakastumisrajalla (15 bar) 10 - 21 til-% (Päivänen 1973). Turvemaiden kuivatus esimerkiksi turvetuotantoa tai viljelykäyttöä varten vähentää suurten huokosten osuutta huomattavasti verrattuna häiriintymättömiin turvemaihin (Mustamo ym. 2016).

2.3 Viljeltyjen turvemaiden ongelmat

2.3.1 Yleistä viljeltyjen turvemaiden ongelmista

Turvemaiden keskeisimpiä viljelytekniisiä ongelmia ovat niiden herkkä liettyminen ja heikko kantavuus, märkyys, happamuus ja hallanarkuus. Lisäksi turvemaat toimivat kasvihuonekaasujen lähteenä. Muita turvemaihin kohdistuvia viljelytekniisiä ongelmia ovat esimerkiksi fosforin ja typen huuhtoumat, tiettyjen aineiden liukoisuuden vaihtelut kuivatuksen yhteydessä, kiintoaineksen kulkeutuminen ja vähäravinteisuus (Myllys 1998). Nämä on kuitenkin rajattu tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

Perunanviljelyssä maata muokataan voimakkaasti niin istutus- kuin nostovaiheessa ja lisäksi viljelyssä käytetään raskaita koneita. Ekonomisista syistä perunaa viljellään useimmiten ilman kasvinvuorotusta eli monokulttuurina (Tuomisto 2013; Kuokkanen ym. 2019). Perunamaiden orgaanisen aineksen määrän on havaittu laskevan ja maan rakenteen heikkenevän (Grandy ym. 2002; Koga ja Tsuji 2010). Perunanviljelyssä pelloilla ajetaan raskailla koneilla istutus ja kylvövaiheissa, jolloin maa saattaa olla märkää. Tämän seurauksena maa tiivistyy helposti. Turvemailla on todettu maan suurten huokosten osuuden laskevan 37 % sekä alentavan maan hydraulista vedenjohtavuutta jopa 89 % ajettaessa neljään kertaan raskailla koneilla (Alakukku 1996).

2.3.2 Maan märkyys ja maan painuminen

Turvemaat pidättävät runsaasti vettä (Myllys 1998), minkä perusteella viljelykasvien vedentarve on turvattu kuivina kausina. Kuitenkin turvemailla viljelyä hankaloittaa usein niiden liika märkyys, sillä turvemaiden vedenjohtavuus on heikkoa, ja ne pidättävät vettä runsaasti (Myllys 1998). Tästä aiheutuu monia maan ilmavuuteen, rakenteeseen ja kantavuuteen liittyviä ongelmia kuten maan liettymistä, kantavuuden heikkenemistä ja maan painumista. Kun maan vedenjohtavuus on heikkoa, maan huokokset täyttyvät vedellä, jolloin kaasujen vaihtuminen maaperän ja ilmakehän välillä heikkenee. Tällöin maaperän happipitoisuus laskee ja hiilidioksidipitoisuus kasvaa. Lisäksi denitrifikaatio kasvaa, mikä aiheuttaa typpihäviötä maasta sekä kaasumaisia dityppioksidipäästöjä (Luku 2.3.3). Happipitoisuuden laskiessa myös rauta ja mangaani pelkistyvät, jolloin niiden liukoisuus samalla lisääntyy. Lopulta kasvien kasvu heikkenee. Märkyys lisää myös metaanipäästöjä (Teh ym. 2011) (Luku 2.3.3).

Märkyys aiheuttaa myös maan rakenteen heikkenemistä, minkä seurauksena maa liettyy. Heinonen (1992) on tarkastellut liettymisen syitä ja vaikutuksia. Liettymistä tapahtuu, kun kuiva maa vettyy äkillisesti tai sadepisaroiden hakkaavasta vaikutuksesta. Lisäksi pitkäkestoinen märkyys liettää etenkin savimaita. Liettyminen heikentää maan ilmanvaihtoa ja vähentää maan vedenjohtavuutta, mikä puolestaan lisää veden kulkeutumista pintavirtailuna, jolloin eroosio lisääntyy. Lisäksi liettyminen heikentää orastumista ja juurten kasvua sekä saattaa kasvattaa kapillaarista vedennousua pohjamaasta.

Maan rakenteen heikentyessä myös maan kantavuus heikkenee. Maan kantavuuden ollessa huono, maa tiivistyy käytettäessä raskaita maatalouskoneita. Turvemaiden maan kantavuus saadaan riittäväksi, kun maata kuivatetaan niin, että maan kosteuspitoisuus on noin 60 – 75 % (Peltomaa 2016). Orgaanisen aineksen maatuneisuus kasvattaa kuivatustarvetta, sillä orgaanisen aineksen mineralisoituessa, sen irtotiheys kasvaa ja partikkelikoko pienenee, minkä vuoksi sen vedenpidätyskyky kasvaa. Siksi usein pelkkä ojitus ei riitä riittävän kuivattamisen saavuttamiseksi, vaan maasta on poistuttava vettä myös haihtumalla (Myllys 1998; Peltomaa 2016).

Turvemaita kuivatettaessa, huokosten vesimäärä laskee, jolloin myös maan rakennetta ylläpitävä veden tuki häviää (Schothorst 1977; Myllys 1998; Ilnicki 2003). Tämä aiheuttaa sekä pohjaveden pinnan yläpuolisen että alapuolisen kerroksen tiivistymistä, jolloin maa alkaa painua (Schothorst 1977; Myllys 1998). Kuivattaminen muuttaa maan olosuhteet aerobisiksi, mikä kiihdyttää orgaanisen aineksen mineralisaatiota, ja vähentää orgaanisen hiilen pitoisuutta maassa. Orgaanisen aineksen mineralisoituessa maan maatuneisuusaste ja irtotiheys kasvavat, mikä aiheuttaa myös maan painumista (Schothorst 1977; Myllys 1998). Turve myös kutistuu kuivuessaan (Okruszko 1993), mikä aiheuttaa osaksi maan painumista (Schothorst 1977; Dawson ym. 2010). Schothorstin (1977) mukaan orgaanisen aineksen mineralisaatio ja turpeen kutistuminen aiheuttavat 65 - 70 % pohjaveden pinnan yläpuolisen maan painumisesta, ja maan tiivistyminen pohjavedenpinnan alapuolella 30 - 35 % painumisesta.

Painumisen seurauksena maan vedenjohtavuus laskee ja vedenpidätys lisääntyy. Tästä aiheutuu jälleen lisäkuivatuksen tarvetta, sillä maan kantavuus heikkenee. Lisäksi maan painumisesta aiheutunut tiivistyminen lisää kasvihuonekaasupäästöjä. Grønlund ym. (2008) mukaan turvemaat voivat painua kuivatuksen seurauksena vuodessa jopa 2,5 cm. Turvemaan painuminen on nopeinta heti kuivatustoimenpiteiden jälkeen, sen hidastuessa ajan kuluessa (Myllys 1998; Grønlund ym. 2008). Turpeen painumiseen vaikuttaa kuivattamisen lisäksi muun muassa turpeen maatuneisuus ja laatu, turvekerroksen alapuolinen maaperä (Dawson ym. 2010), ilmasto, mikrobiologia ja maan käyttö, kuten lannoitus, kalkitus ja muokkaus.

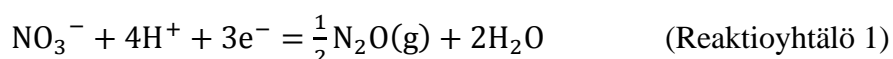
Pitkän ajan kuluessa orgaanisen aineksen hajoaminen ja maan painuminen aiheuttaa turvekerroksen ohenemista (Myllys 1998). Turpeen alla oleva pohjamaa määrää sen, voiko maata enää käyttää

viljelyyn. Pohjamaa voi esimerkiksi olla kivinen tai riittävää kuivatussyvyyttä on enää mahdoton saavuttaa (Myllys 1998), mikä voi estää pellon viljelykäytön.

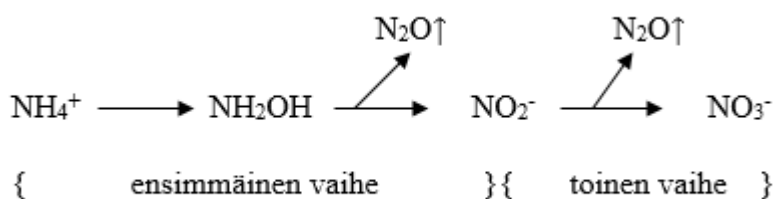
2.3.3 Kasvihuonekaasupäästöt

Luonnontilaiset, ojittamattomat, veden kyllästämät turvemaat toimivat hiilinieluina (Maljanen ym. 2001). Viljelykäytössä olevat orgaaniset maatalousmaat ovat yleensä CO₂:n lähteitä, sillä kasvien yhteyttämisprosessissa kasvillisuuteen ei sitoudu hiilidioksidia yhtä nopeasti kuin maan orgaanisen aineksen hajotuksessa vapautuu (Maljanen ym. 2001; Lohila ym. 2004). Turvemaiden ottaminen viljelykäyttöön vaatii maan kuivattamista, minkä seurauksena maan pohjaveden pinnan lasku tekee turvekerroksen osittain tai kokonaan hapelliseksi, ja mikrobiologisesti tapahtuva mineralisaatio kiihtyy. Orgaanisen aineksen mineralisaatiossa mikrobit hapettavat orgaanista ainesta hiilidioksidiksi, vedeksi ja epäorgaanisiksi suoloiksi, mikä vapauttaa samalla energiaa mikrobien käyttöön ja orgaaniseen ainekseen sitoutunutta hiiltä takaisin ilmakehään. Turvemaita viljeltäessä maata käännetään maanmuokkauksella säännöllisesti, kalkitaan happamuuden takia sekä lannoitetaan (Maljanen ym. 2007b). Nämä toimenpiteet luovat mikrobeille suotuisimmat elinolosuhteet, mikä kiihdyttää orgaanisen aineksen hajotusta ja vapauttaa CO₂ ilmakehään (Ivarson 1977; Maljanen ym. 2007b). Suomessa viljeltyjen turvemaiden hiilidioksidipäästöjen on arvioitu olevan vuosittain noin 5 Tg, mikä on noin 8% ihmistoiminnan aiheuttamista päästöistä, jos mukaan ei oteta biomassan polttoa (Kasimir-Klemedtsson ym. 1997).

Hiilidioksidin lailla myös N₂O:n tuotto kasvaa, kun orgaanisia maita kuivatetaan ja muokataan (Martikainen ym. 1993; Kasimir-Klemedtsson ym. 1997). Sadan vuoden aikajaksolla tarkasteltuna dityppioksidin (N₂O) lämmittävä vaikutus on hiilidioksidia 265 kertaa voimakkaampi (IPCC 2014). Dityppioksidia muodostuu yleisimmin denitrifikaatioprosessissa, mutta myös nitrifikaatioprosessissa. Denitrifikaatiossa maan happipitoisuuden laskiessa denitrifikaatiobakteerit pelkistävät maassa esiintyvää nitraattia (NO₃⁻) nitriitiksi (NO₂⁻), typpioksidiksi (NO) ja edelleen dityppioksidiksi (N₂O) (Reaktioyhtälö 1) (Strawn ym. 2015). Jos denitrifikaatio etenee loppuun asti, syntyy typpikaasua (N₂), joka ei ole kasvihuonekaasu. Denitrifikaatiota tapahtuu yleisimmin maan pH:ssa 6-8.

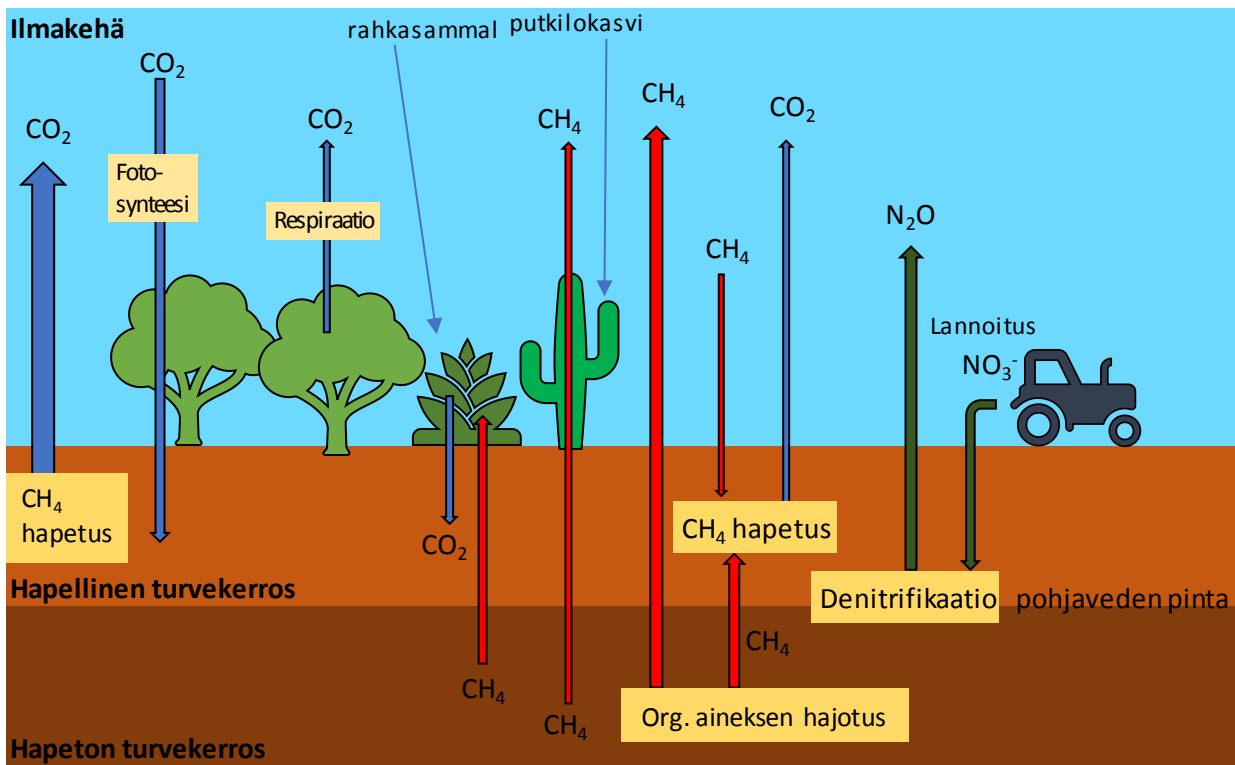


Nitrifikaatioprosessissa kemoautotrofiset bakteerit hapettavat ammoniumia (NH_4^+) ensin nitriitiksi (NO_2^-), ja edelleen nitraatiksi (NO_3^-). Prosessi tapahtuu hapellisissa olosuhteissa pH:n ollessa yli 5 (Kebreab ym. 2006). Hapenpuutteessa nitrifikaatioprosessin sivutuotteena syntyy dityppioksidia (Kuva 1) (Kebreab ym. 2006). Orgaaniset maatalousmaiden N_2O päästöt olivat vuonna 2018 1,5 miljoonaa tonnia CO_2 -ekv. (Tilastokeskus 2020). Dityppioksidipäästöjen muodostumiseen vaikuttavat turvemailla maan pH, kosteus, lämpötila, kasvillisuus, viljelytoimenpiteet kuten muokkaus ja lannoitus, hapen määrä sekä liukoisen orgaanisen hiilen määrä (Maljanen ym. 2007b). Esimerkiksi talvikuukausina N_2O :n tuotto saattaa olla ajoittain paljon suurempi kuin kesäkuukausina (Nykänen ym. 1995; Maljanen ym. 2007a).



Kuva 1. Dityppioksidin muodostuminen nitrifikaatiossa (muokattu Charpentier ym. 2007 mukaan).

Ojittamattomat turvemaat ovat luontaisia metaanin lähteitä. Märkyys luo maaperään anaerobiset olosuhteet, joissa metanogeeniset bakteerit hajottavat orgaanista ainesta tuottaen metaania. Sadan vuoden aikajaksolla tarkasteltuna metaanin lämmittävä vaikutus on hiilidioksidia 28 kertaa voimakkaampi (IPCC 2014). Sen sijaan aerobisissa maakerroksissa metanotrofiset bakteerit hapettavat alemmista määristä ja hapettomista kerroksista nousevaa metaania vedeksi ja hiilidioksidiksi, ja saavat tästä energiaa omaan käyttöönsä (Kuva 2) (Kasimir-Klemedtsson ym. 1997; Larmola ym. 2014). Siksi hyvin kuivatetut turvemaat saattavat toimia ilmakehästä peräisin olevan metaanin nieluina (Maljanen ym. 2007a ja 2007b). Metaanin kulutus ja tuotto vaihtelevat olosuhteiden mukaan. Maljanen ym. (2003) havaitsivat, että turvemaat tuottivat metaania kuivina kesäkuukausina, kun taas vuositasolla tarkasteltuna turvemaat olivat metaaninieluja. Metaanin hapetus riippuu maaperässä muun muassa pH:sta (Hütsch ym. 1994), maan lämpötilasta (Nykänen ym. 1995) ja pohjaveden pinnan korkeudesta (Nykänen ym. 1995). Se, toimiiko turve metaanin nettotuottajana vai -sitojana, määräytyy metaanin tuoton ja kulutuksen summan perusteella (Larmola ym. 2014).



Kuva 2. Turvemailla syntyvien kasvihuonekaasujen muodostuminen ja kulkeutuminen turpeen eri kerroksissa ja ilmakehässä (muokattu Sihvosen 2014 mukaan).

2.3.4 Roudan hidas sulaminen, hallanarkuus ja kylmyys

Maan lämpötalouden perusilmiöitä ovat lämmön kuljetus sekä lämmön varastoituminen. Lämmönjohtuminen on lämmönkuljetusta maassa kahden pisteen välillä lämpötilaerojen vaikutuksesta. Sitä kuvataan Fourierin lailla (Kaava 4, Hillel 2004). Muita lämmönkuljetusta kuvaavia perusilmiöitä ovat säteily, heijastuminen ja konvektio.

$$q_h = -\kappa \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (4)$$

jossa

q_h = maakerroksen läpi kulkeutuva lämpövuoto ($\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

κ = lämmönjohtavuus ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1} = \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), joka on maan ominaisuuksista riippuva materiaalikerroin

$\Delta T/\Delta x$ = lämpötilagradientti (K m^{-1}).

Lämmönjohtavuus riippuu maan tekstuurista eli lajitekoostumuksesta, maan vesipitoisuudesta, huokoisuudesta, irtotiheydestä, maan kivennäisaineksen ja orgaanisen aineksen pitoisuudesta sekä

maan struktuurista (Adu-Hamdeh ja Reeder 2000; Hillel 2004). Orgaanisen aineksen pitoisuuden ja suolapitoisuuden kasvaessa lämmönjohtavuus laskee, kun taas tiheyden ja vesipitoisuuden kasvaessa lämmönjohtavuus nousee (Adu-Hamdeh ja Reeder 2000). Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa myös huokosten jatkuvuus sekä niiden muoto (Mustamo 2017). Maaperän lämpötilan vaihtelua ja lämmön siirtymistä maassa, jossa ei ole lämpönieluja tai -lähteitä, voidaan kuvata Fourierin laista (Kaava 4) johdetulla lämmön kuljetusyhtälöllä (Kaava 5, Hillel 2004)

$$\nabla q_h = \rho c_m \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) \left[\kappa \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right], \quad (5)$$

jossa

ρc_m = lämpökapasiteetti (usein esitetty myös C) ($\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)

$\partial T / \partial t$ = lämpötilan muutos ajan suhteen (K s^{-1})

κ = lämmönjohtavuus ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1} = \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

$\partial T / \partial x$ = lämpötilan muutos paikan suhteen (K m^{-1})

q_h = lämpövuoto ($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Lämmön varastoitumista kuvaava lämpökapasiteetti kuvaa sitä, kuinka hyvin maa kykenee varastoimaan lämpöenergiaa ja kuinka paljon energiaa on käytettävää, jotta maatilavuuden lämpötila nousee yhdellä asteella, kun faasimuutoksia ei tapahdu (Hillel 2004). Lämmönjohtavuuden ja lämpökapasiteetin suhdetta kutsutaan lämmön diffusiviteetiksi ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, Kaava 6, Hillel 2004)

$$D_T = \frac{\kappa}{C}, \quad (6)$$

jossa

κ = lämmönjohtavuus ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1} = \text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

C = lämpökapasiteetti ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$).

Lämmön diffusiviteetti kuvaa lämpötilaerojen tasoittumisnopeutta eli mitä suurempi lämmön diffusiviteetti maassa on, sitä syvemmälle maanpinnalla tapahtuvat lämpötilan vaihtelut ulottuvat.

Turvealueiden otossa viljelykäyttöön, alueet on ensin kuivatettu ojittamalla. Ojittaminen laskee pohjaveden pinnan korkeutta alemmaksi, jolloin maan vesipitoisuus laskee ja huokokset täyttyvät ilmalla. Koska ilman lämmönjohtavuus on huomattavasti pienempi kuin veden (Taulukko 1), maan kyky kuljettaa lämpöä heikkenee. Tästä syystä johtuen viljeltyjen turvemaiden yleisenä ongelmana on roudan hidas sulaminen, hallanarkuus ja kylmyys (Pessi 1958, Pessi 1966; Myllys 1998). Routa on maahuokosissa olevan maaveden jäätymisestä aiheutuvaa maan jäykistymistä ja maanpinnan

kovettumista. Maan pinnan liikkumista veden noustessa kapillaarisesti routarajan yläpuolella olevaan jäätymyskeskukseen kutsutaan routimiseksi, mikä on turvemailla harvinaista. Viljeltyjen turvemaiden roudan hidas sulaminen saattaa viivästyttää merkittävästi kasvukauden aloitusta, ja siten lyhentää kasvukauden pituutta. Toisaalta huono lämmönjohtavuus vähentää myös maan routaantumista ja roudan paksuus jää pieneksi. Ilman lämpökapasiteetti on pienempi kuin veden. Tämän takia kuivatetuilla turvemailla roudan sulaminen, mutta myös routaantuminen on hidasta.

Hallaksi kutsutaan raskaan kylmän ilman laskeutumista lähelle maan pintaa, jossa lämpötila laskee alle 0 °C:een, vaikka 2 m korkeudessa ilman lämpötila pysyy yli 0 °C:ssa. Hallan vaara on erityisen suuri turvemailla, sillä ne sijaitsevat yleensä alavilla alueilla, jonne kylmä ilma laskeutuu (Myllys 1998). Pessi (1958; 1966) on havainnut turvemaiden kuivatuksen takia alentuneen lämmönjohtavuuden laskevan öiden alinta lämpötilaa kasvillisuuden ylärajassa, mikä kasvattaa hallan riskiä. Hallaa esiintyy sekä kasvukauden alussa että lopussa, ja se aiheuttaa pahimmillaan sadonmenetyksiä (Lindholm ja Vasander 1983). Lisäksi kylmyys heikentää kasvua (Hytönen ja Silfverberg 1991).

Taulukko 1. Erilaisten materiaalien lämpöominaisuuksia.

	Tiheys, kg m⁻³	Lämpökapasiteetti, kJ kg⁻¹ K⁻¹	Lämmönjohtavuus, W m⁻¹ K⁻¹	Lämmön diffusiviteetti, m² s⁻¹ * 10⁻⁷	Lähde
Vesi (25 °C)	999,87	4,20	0,56	1,43	a
Ilma (10 °C)	1,25	1,00	0,0026	0,21	a
Saves	1450	0,88	1,28	10	a
Graniitti	2750	0,89	1,7–4,0	12	a
Orgaaninen aines			0,25		b
Turve			0,57–0,71	1,5–1,8	c
Kipsi	1000	1,09	0,51	4,7	a
Selluloosa	1380	1,67	0,23	1	a

a Jacobsen ym. 2003

b Hillel 2004

c Hanson ym. 2000

Maan lämmönjohtavuus riippuu maan mineraalikoostumuksesta, mutta myös maahiukkasten ja murujen muodosta, koosta ja keskinäisestä järjestyksestä (Hillel 2004). Tämän takia turvemaiden

kuivatuksesta, peltoliikenteestä tai muista tekijöistä aiheutuva tiivistyminen saattaa lisätä maan lämmönjohtavuutta, tai kuten Heikurainen ja Seppälä (1963) mainitsevat tiivistymisen vaikuttavan ”edullisesti lämpöolojen kehitykseen” turvemaidella. Tiivistyessään maan irtotiheys kasvaa ja huokostilavuus pienenee, jolloin veden täyttämien huokosten osuus maassa kasvaa, ja koska veden lämmönjohtavuus on korkeampi kuin veden, saattavat roudasta, hallasta ja kylmyydestä aiheutuvat viljelyä haittaavat ongelmat tämän seurauksena vähentyä.

2.3.5 Happamuus

Turvemaat ovat luontaisesti happamia, koska orgaaninen aines sisältää orgaanisia happoja (Hadzic ym. 2020), sekä koska kasvien juurten kationien otto ja hapan laskeuma lisäävät maaveden vetyionipitoisuutta (H_3O^+ , jäljempänä H^+). Jos turpeen alapuolinen kivennäismaakerros koostuu happamasta sulfaattimaasta tai mustaliuskevaltaisesta kivennäismaasta, näiden sisältämien sulfidien hapettuminen sulfaateiksi esimerkiksi kuivatuksen seurauksena vapauttaa myös happamoittavia vetyioneja maaveteen (Kauppinen 2015). Suomessa turvemaiden pH vaihtelee 3,5 - 5,5 välillä (Virtanen ym. 2003). Maan pH kuvaa maaveden happamuuden intensiteettiä. Maavesilietoksen vetyioniaktiivisuuden lukuarvo riippuu sen määrittäytavasta.

Maan happamuus vaikuttaa merkittävästi maan viljelyominaisuuksiin, kuten kationinvaihtokapasiteettiin, ravinteiden pidättymiseen, metallien liukoisuuteen, mikrobiologiseen aktiivisuuteen ja maan rakenteeseen. Maan happamoituessa maan kationinvaihtokapasiteetti pienenee, kun maaveden H^+ -ioni pidättyy orgaanisen aineksen variaabeleille kationinvaihtopaikoille vaihtumattomaan muotoon, syrjäyttäen vaihtopaikalla olevan kationin, jolloin kationi on altis huuhtoutumiselle. Maan happamoituminen heikentää spesifisesti adsorboituvien ravinneanionien kasvien käyttökelpoisuutta, sillä niiden adsorboituminen Al- ja Fe-oksidi-pinnoille tehostuu pH:n laskiessa. Normaalisti turvemaat ovat Al- ja Fe-oksidi-kohtia, mutta muokkauksen tai muun toiminnan seurauksena näitä oksideja saattaa turvemaassa esiintyä. Useiden metallien liukoisuus kasvaa maan pH:n laskiessa (Nystrand ja Österholm 2013). Toisaalta orgaaninen aine kompleksoi metalleja, jolloin niiden liukoisuus vähenee. Turvemaiden liukoisen Al^{3+} -pitoisuus on pienempi kuin kivennäismailla, koska turvemaat ovat syntyneet niille sijoilleen soistumisen seurauksena. Kuitenkin turvekerroksen alapuolisesta kivennäismaakerroksesta voi kulkeutua kasveille toksista liukoista Al^{3+} , mutta sen kompleksoituminen orgaanisen aineksen kanssa vähentää sen biosaatavuutta.

Maan happamoituminen vähentää maan mikrobiologista aktiivisuutta. Maan happamoituessa orgaanista ainesta hajottavien bakteerien osuus vähenee ja sienten osuus kasvaa. Sienet käyttävät suurimman osan hajotustuotteista omaan energiametaboliaansa, mikä heikentää kasvien ravinteiden saantia ja siten kasvien kasvu heikkenee. Tällöin kasvit myös ovat alttiimpia esimerkiksi kasvitaudeille. Bakteerien osuuden vähetessä myös niiden tuottamien maan rakennetta stabiloivien lima-aineiden osuus vähenee. Tämä saattaa heikentää maan rakennetta huomattavasti.

3 Maanparannus ja maanparannusaineet

3.1 Maanparannuksen tavoite ja keinot

Maanparannuksella pyritään vaikuttamaan maan kemiallisiin, fysikaalisiin tai biologisiin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi maan rakenteeseen, maan happamuuteen, ravinteiden pidätykseen, hiilipitoisuuteen ja mikrobiologiseen aktiivisuuteen (Bulluck ym. 2002; Melero ym. 2007). Maanparannukseen käytettävät aineet voivat olla joko orgaanisia tai epäorgaanisia, ja niiden käytöllä pyritään epäsuorasti vaikuttamaan maan kasvukuntoon ja viljelykasvien kasvuun. Mineraalilannoitteet eivät ole maanparannusaineita sillä ne vaikuttavat suoraan kasvien kasvuun, mutta orgaanisilla lannoitteilla voi kasvien ravitsemuksen ohella olla maanparannusvaikutus. Sen sijaan maanparannusaineet voivat sisältää kasvinravinteita, vaikka niitä ei suoraan luokiteltaisi lannoitteiksi. Kasvinravinteiden pitoisuudet on ilmoitettava, mikäli pitoisuus ylittää 1000 mg kg^{-1} kuiva-ainetta (Maa- ja metsätalousministeriö 2015).

Maanparannusaineita valmistetaan erikseen maanparannuskäyttöön, mutta kiertotalouden edistyessä ja uusien jätedirektiivien tullessa voimaan myös teollisuuden sivutuotteita on alettu käyttää sekä jatkojalostamaan maanparannustarkoituksiin. Etenkin metsäteollisuudesta sekä biokaasutuotannosta syntyy paljon sivuvirtoja, joiden hyödyntäminen maanparannusaineina muun muassa edistää kiertotaloutta, lisää maaperän hiilipitoisuutta sekä parantaa satotasoja.

Turvetuotannosta poistuneiden suopohjien viljelykäyttöön otossa tärkeimpänä maanparannustoimien piteenä on pidetty kalkitusta (Virkajärvi ja Huhta 1998) ja syväkyntöä, jossa

turvekerroksen alapuolista kivennäismaata sekoitetaan pintamaahan (Pessi 1966). Kivennäismaalisäystä on myös käytetty parantamaan maan kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia (Pessi 1966; Kemppainen 1992), mutta nykyään sen käyttö Suomessa on vähäistä (Myllys 1998).

Tässä tutkimuksessa teollisuuden sivutuotteista tarkastellaan kipsisakkaa ja kuitusavea. Muita maanparannusaineita ovat esimerkiksi biohiili, kuituliete, bioliete, biomädäte, rakennekalkki, jätevesien puhdistuksessa syntyvät lietteet sekä komposti.

3.2 Kuitusavi

Eri lähteiden mukaan kuitusavi (engl. paper mill sludge tai fiber clay) on joko sellu- ja paperiteollisuuden jätevedenpuhdistuksen esiselkeytysvaiheessa syntyvää primäärilietettä (Pöykiö 2009; Tuomisto 2017; Kuokkanen ym. 2019) tai keräyspaperin puhdistuksessa syntyvää siistauslietettä (de-ink) (Norrie ja Gosselin 1996). Toisten lähteiden mukaan kuitusavi sisältää sekä primäärilietettä että siistauslietettä (Lohiniva ym. 2001; Ojanen 2001; Ramboll 2008). Kirchmannin ja Bergströmin (2003) kuitusavi-termiä käytetään hyvin yleisesti erilaisista paperin valmistuksessa syntyvistä sivutuotteista, mikä voi aiheuttaa epäselvyyksiä.

Kuitusaven koostumus vaihtelee, sillä se riippuu käytetyistä raaka-aineista ja paperinvalmistusmenetelmistä, ja on siten tehdaskohtaista (Norrie ja Gosselin 1996; Trepanier ym. 1996; Pöykiö ym. 2009; Virolainen 2017). Pääasiassa kuitusavi koostuu ligniiniä ja muita orgaanisia yhdisteitä sisältävistä selluloosakuiduista, sekä epäorgaanisista kalsiumkarbonaatista, talkista ja kaoliinista, joka on alumiinisilikaattimineraali (Trepanier ym. 1996; Pöykiö ym. 2009; Tuomisto 2013; Bajpai 2015). Vuonna 2013 Suomessa kuitusavea muodostui massa- ja paperitehtaiden sivutuotteena noin 334 000 tonnia (Hyvönen 2014).

Kuitusaven hiilipitoisuus on korkea (Camberato ym. 2006; Kuokkanen ym. 2008; Lindroos ym. 2016), ja siksi maahan lisättynä sen on todettu kasvattavan maan hiilipitoisuutta (Norrie ja Gosselin 1996; Kuokkanen ym. 2019). Lisäksi kuitusaven on todettu parantavan maan rakennetta, vedenpidätyskykyä ja mikrobien olosuhteita, sekä vähentävän maan kuorettumista, eroosiota ja ravinteiden huuhtoutumista (Kuokkanen ym. 2008; Kuokkanen ym. 2019). Kuitenkin kuitusaven

käytön on todettu laskevan satomääriä, sillä sen hajoaminen maaperässä lisää typen immobilisaatiota (Aitken ym. 1998). Kuivuessaan kuitusavi tiivistyy, sen vedenläpäisevyys laskee merkittävästi ja siitä tulee hyvin kovaa (Kuokkanen ym. 2008). Kuitusavea on pääasiallisesti käytetty kaato- ja liikuntapaikkarakentamisessa tiivistysmateriaalina sen vähäisen vedenjohtavuuden takia (Ramboll 2008; Hyvönen 2014; Virolainen 2017). Kuitusavella on havaittu olevan kalkitusvaikutusta. Kuokkasen ym. (2008) mukaan kuitusavea tarvitsisi käyttää vain 50 % enemmän verrattuna tavanomaisiin kalkitusaineisiin. Kuitusavi on hyvä vaihtoehto perinteisille kalkitusaineille sillä sen käyttö edistää kiertotaloutta ja teollisuuden sivutuotteena syntyessään sen valmistus ei suoraan tuota hiilidioksidipäästöjä.

Puusta ja sen käsittelystä kuitusaveen päätyvät raskasmetallit ovat niukkaliukoisia ja niiden pitoisuudet ovat pieniä (Pöykiö ym. 2009). Siten raskasmetallipitoisuudet alittavat maanparannusaineille ilmoitettujen raskasmetallien enimmäispitoisuudet (Ruokavirasto 2020), ja kuitusavea on turvallista käyttää.

3.3 Kipsisakka

Kipsi eli kalsiumsulfaatti (CaSO_4 , tarkemmin kideveden kanssa esitettynä $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) on luonnossa esiintyvä mineraali, mutta sitä syntyy myös teollisuuden sivutuotteena. Kipsiä on käytetty maanviljelyssä hyvin kauan, ja se onkin ensimmäinen kaupallinen lannoitevalmiste (Mattila ym. 2019). Teollisesti tuotettu ja luonnon kipsi eivät rakenteeltaan toisistaan muuten kuin, että teollisen kipsin kiderakenne on pienempi kuin luonnon kipsin, sen nopeamman muodostumisen vuoksi. Sen sijaan hiilivoimaloiden savukaasujen poistossa syntyvä kipsi saattaa sisältää epäpuhtauksia, kuten raskasmetalleja (Chen ym. 2015). Teollisesti tuotettua kipsiä syntyy hiilivoimaloissa sekä fosforihappoteollisuudessa. Hiilivoimaloiden savukaasujen rikinpoiston märkämenetelmässä savukaasuun sumutetaan alkalista kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) tai kalsiumoksidia (CaO). Alkalisen pesunesteen ja savukaasujen sisältämä rikkidioksidin reagoidessa syntyy kalsiumsulfaattia eli kipsiä, joka lopuksi kuivataan (Huhtinen ym. 2000). Fosforihapon valmistuksessa apatiittimalmia liuotetaan rikkihapolla, jolloin syntyy fosforihappoa ja kipsiä.

Teollisuuden sivutuotteena syntyvän kipsin käyttömahdollisuudet ovat moninaiset. Sitä voidaan käyttää kipsilevyjen raaka-aineena, sementin valmistuksessa, kipsaukseen sekä lääketieteessä että

keramiikan valmistuksessa. Sitä käytetään myös maanparannusaineena ja sen käyttöä tutkitaankin maatalouden vesiensuojelukeinona (Ollikainen ym. 2018). Käytettyjä kipsilevyjä voidaan kierrättää ja uusiokäyttää kipsilevyjen raaka-aineena, mutta kiertotalouden edistämiseksi niitä voidaan mahdollisesti käyttää mahdollisesti myös maanparannusaineena. Esimerkiksi Heiskasen (2017) tutkimuksessa tutkittiin kipsilevyjätteen käyttöä männyn ja kuusen kasvualustana yhdessä turpeen kanssa. Tulosten mukaan kipsilevyjätteen käytön osana kasvualustaa ei havaittu aiheuttavan ongelmia taimien kasville.

Kipsin vaikutus maanparannusaineena perustuu maan eroosioherkkyyden vähenemiseen ja liukoisessa muodossa olevan fosforin huuhtoutumisen vähenemiseen. Kipsi dissosioituu maanesteessä kalsium- (Ca^{2+}) ja sulfaatti-ioneiksi (SO_4^-), ja maahiukkasten ympärillä oleva sähköinen kaksoiskerros puristuu kasaan maanesteen ionivahvuuden kasvaessa. Tällöin maapartikkelit pääsevät lähemmäs toisiaan, jolloin maahiukkaset flokkulaatio ja makromurujen muodostuminen helpottuu, ja maan eroosio vähenee. Kalsiumionit pystyvät myös muodostamaan metallikationisiltoja negatiivisesti varautuneiden maahiukkasten välille, jolloin maamurujen koko suurenee ja maan eroosioherkkyys vähenee. Tällöin myös maamuruihin pidättyneen fosforin kulkeutuminen vesistöihin vähenee. Liukoisessa muodossa olevan fosforin pidättyminen tehostuu, kun maan ionivahvuus kasvaa (Yli-Halla ja Hartikainen 1996). Kipsikäsittelyn on havaittu vähentävän liukoisen fosforin huuhtoutumista kivennäismailla (Zhu ja Alva 1994), kun fosfaattifosfori saostuu niukkaliukoiseen muotoon yhdessä kalsiumin kanssa (Zhu ja Alva 1994). Lisäksi kipsiä voidaan käyttää kalsium- ja rikkilannoitteena. Kipsin käyttö vähentää kasvien kasville haitallisen alumiinin saatavuutta, vähentämällä sen liukoisuutta (Zoca ja Penn 2017). Kuitenkin kipsin käytön on havaittu lisäävän vaihtuvan magnesiumin ja kaliumin huuhtoutumista (Syed-Omar ja Sumner 2008), kun Ca^{2+} pidättyy kationinvaihtopaikoille syrjäyttäen Mg^{2+} ja K^+ -ioneja maaveteen.

Kipsin maanparannuskäyttöä rajoittava tekijä on sen sisältämä sulfaatti. Kipsin käyttöä maanparannusaineena ei suositella käytettäväksi alueilla, joiden valuma-alue kohdistuu sisävesiin, sillä järvien sulfaattipitoisuus on matala (Ekholm ym. 2012). Järvien sulfaattipitoisuuden kasvu saattaa lisätä järvien sisäistä kuormitusta, koska se vapauttaa pohjasedimentistä liukoista fosforia yläpuoliseen vesipatsaaseen (Ollikainen ym. 2018). Kipsin levitystä routaiseen maahan ei myöskään suositella, sillä kipsi ei reagoi tarpeeksi jäätyneiden maahiukkasten kanssa (Ekholm ja Järvenranta 2020). Heidän mukaansa fosforihappoteollisuuden sivutuotteena syntyneen kipsin sisältämää fosforia saattaa huuhtoutua vesistöihin, mikä lisää vesistöjen fosforikuormitusta.

4 Tutkimuksen tavoitteet ja työhypoteesit

Tämän maisteritutkielman tavoitteena on tarkastella teollisuuden sivutuotteena saatavien maanparannusaineina käytettävien kuitusaven ja kipsisakan vaikutuksia maan rakenteen kestävyteen, kasvihuonekaasujen tuottoon sekä maan lämpö- ja kaasutalouteen turvemailla. Lisäksi työssä tarkastellaan maanparannusaineiden vaikutusta maan happamuuteen. Tutkimus tehtiin laboratoriossa kenttäkokeelta otetuista rakenne-, irtomaa- ja viljavuuskairanäytteistä. Kuitusaven tai kipsin käytöstä maanparannusaineena viljellyillä turvemailla on hyvin vähän tutkittua tietoa. Työn hypoteeseina olivat:

1. maanparannusaineiden käyttö parantaa maan rakenteellisia ominaisuuksia, vähentäen muun muassa liettymistä,
2. maanparannusaineiden käyttö vähentää kasvihuonekaasupäästöjä hiilidioksidin ja dityppioksidin osalta, mutta ei vaikuta metaanin hapettumiseen aerobisessa maassa
3. maanparannusaineiden käyttö parantaa maan lämpötalousominaisuuksia lisäämällä lämmönjohtavuutta ja -diffusiviteettia.

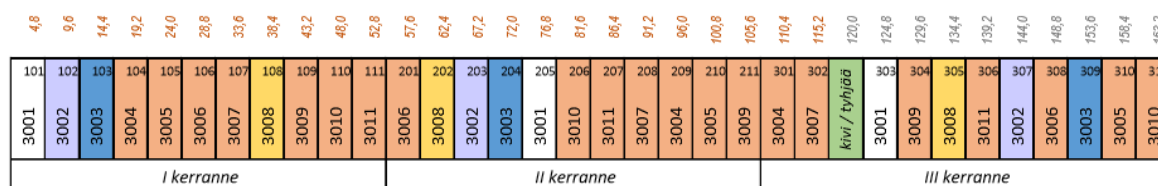
Maanparannusaineiden vaikutuksia maan liettymiseen tutkittiin mittaamalla maanäytteiden maamurujen vedenkestävyyttä laboratoriossa eri alkukosteuksissa. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka maan kuivatus vaikuttaa murujen vedenkestävyyteen ja kuinka maanparannusaineiden käyttö vaikuttaa murujen kestävyteen murujen äkillisesti kostuessa.

Viljeltyt turvemaat ovat ojituksen seurauksen aerobisia, minkä vuoksi ne toimivat useimmiten metaanin nieluna. Maanparannusaineiden ei odotettu vaikuttavan metaanin tuottoon eikä kulutukseen maassa, mutta mielenkiinnosta metaanin kulutus kuitenkin mitattiin. Maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti mitattiin maan lämpöominaisuuksien määrittämiseksi.

5 Aineisto ja menetelmät

5.1 Koejärjestely, näytteenotto ja esikäsittely

Koe toteutettiin kenttäkokeena vuosina 2017 - 2018 Ylistaron Jaurissa, Seinäjoella Jarmo Kiikan omistamalla suopohjalla, joka oli ollut noin 5 vuotta turvetuotantoalueena. Turvetuotannon loputtua 2000-luvun alussa alueella oli kasvanut vapaasti heinää ja rikkaruohoja, ja alue toimi vaihettumisvyöhykkeenä metsän ja varsinaiseen viljelykäyttöön otetun peltoalan välissä. Maalajiltaan koeala oli metsäsaraturvetta (LCt). Koeala oli kokonaisuudessaan 1272 m² ja yksi koeruutu oli kooltaan 4,8 m × 8 m. Koejärjestely toteutettiin kolmena kerranteena, jossa koejäsenet olivat satunnaistetussa järjestyksessä (Kuva 3). Koejäsenet olivat erilaisia maanparannusainekäsittelyitä, jotka on esitetty taulukossa 2. Maanparannusaineet levitettiin koeruudille 7.7.2017. Kaikkia muita koejäseniä paitsi 0-kontrollia peruslannoitettiin kasvukauden aikana tärkkelysperunan väkevöidyllä solunesteellä 7 m³ ha⁻¹ (N 70, P 15, K 189 kg ha⁻¹). Kokeen aikana koealalla kasvatettiin tärkkelysperunaa (lajike Tanu). Tähän gradutyöhön koejäsenistä otettiin mukaan koejäsenet lannoittamaton (3001), kontrolli (3002), kipsisakka 3 (3004), kuitusavi 15 (3007), kuitusavi 15 + kipsisakka 3 (3009) sekä kuitusavi 3 (3011).



Kuva 3. Kenttäkoekartta.

Taulukko 2. Koejäsenet ja maanparannusaineiden levitysmäärät.

Koejäsen ^a	Kuvaus	Levitysmäärä, kg m ⁻²
3001	0-kontrolli, ei lannoitusta	-
3002	Kontrolli	-
3003	Kontrolli + harsokate	-
3004	Kipsisakka	3
3005	Biohiili	3
3006	Kuituliete	15
3007	Kuitusavi	15
3008	Kuitusavi + harsokate	15
3009	Kuitusavi + kipsisakka	15 + 3
3010	Biomädäte	0,5
3011	Kuitusavi	3

^a Vihreällä on merkitty tässä työssä tarkasteltavat käsittelyt ja valkoiset on jätetty tämän työn tarkastelun ulkopuolelle.

Maanäytteenotto suoritettiin lokakuussa 2017. Rakennenäytteet otettiin maan vedenjohtavuuden, maan vedenpidätysominaisuusominaisuuksien määrittämistä sekä kaasun diffuusiomittauksia ja lämpöominaisuuksien mittausta varten. Rakennenäytteet otettiin ruuduittain kuutena rinnakkaisena Eijkelkampin näytteenottovälineillä 250 cm³ metallilieriöihin. Näytteet otettiin kerranteista I ja III kahden perunapenkin päältä, kolme kummastakin penkistä. Kerranteesta II rakennenäytteet otettiin vain yhdestä penkistä, koska lämpötila ja kosteusanturit oli sijoitettu kerranteessa toiseen penkkiin. Näytteenottokohdista kuorittiin lapiolla päällimmäinen maa-aines pois, jolloin näytteenottosyvyys oli 5-15 cm. Irtomaan näytteenotto suoritettiin lapioiden avulla maata pusseihin samoista penkeistä, mistä rakennenäytteet oli otettu, kuitenkin kohdista, jossa maata ei ollut häiritty. Hiilipitoisuuden määrittystä varten näytteet otettiin viljavuuskairalla kaikista koejäsenistä penkkien päältä koko penkin pituudelta. Kairanäytteet otettiin niiden käsittelyjen kohdalla viereisistä penkeistä, mistä oli otettu rakenne- ja irtomaanäytteet.

5.2 Mittaus- ja analyysimenetelmät

Kaikista koejäsenistä määritettiin laboratoriossa CO₂-, N₂O- ja CH₄ -tuotto, maan lämmönjohtavuus ja -diffusiviteetti sekä maan vedenjohtavuus ja vedenpidätyskäyrä. Maamurujen vedenkestävyys sekä maan pH ja sähköjohtavuus määritettiin kaikista muista koejäsenistä paitsi lannoittamattomasta kontrollista.

5.2.1 Maamurujen vedenkestävyys

Maamurujen vedenkestävyys määritettiin kenttäkosteasta, ilmakeivästä ja esikostutetusta maasta. Murujen ilmakeiväys tehtiin levittämällä kenttäkosteaa maata tarjottimelle ja kuivattiin lämpökaapissa (Memmert) +30 °C:ssa. Kenttäkosteasta ja ilmakeivästä maasta erotettiin halkaisijaltaan 2 - 10 mm kokoiset murut mekaanisesti käsin seulomalla. Osa ilmakeivästä muruista siirrettiin ilmatilviisiin purkkeihin esikostutamaan deionisoitulla vedellä (n. 40 ml) kostutettujen papereiden päälle huoneenlämpöön kahdeksi vuorokaudeksi.

Murujen märkäseulonta suoritettiin Eijkelkampin märkäseulontalaitteella (Wet sieving apparatus, 08.13). Muruja punnittiin neljä grammaa laitteen seuloille, joiden silmäkoot olivat 0,25 mm ja 2 mm. Seulontalaitteen vesikippoihin mitattiin mittalasilla 100 ml deionisoitua vettä. Muruja seulottiin vedessä kolmen minuutin ajan, minkä jälkeen seuloille jääneet murut huuhdeltiin taaratuille suodatinpapereille (Whatman 589/3). Muruja kuivattiin lämpökaapissa (Memmert) +105 °C yön yli. Kuivauksen jälkeen murut suodatinpapereineen punnittiin (Precisa 100A–300M). Maamurujen vedenkestävyys (eli vedenkestävien murujen osuus) laskettiin jakamalla seulan päälle jäänyt maan kuivamassa määritykseen otetun maanäytteen alkuperäisellä kuivamassalla.

5.2.2 Kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus

Ennen mittausa 250 cm³ teräslieriöissä olleiden rakenteellisten maanäytteiden alapinnalle asetettiin suodatinkankaat ja näytteet kyllästettiin keitetillä vesijohtovedellä. Näytteet punnittiin (Precisa LS 2200C) ja asetettiin kylkiasennossa mittauslaitteiston (Eijkelkamp permeameter) näytedidikkeeseen.

Näytepidikkeeseen lisättiin vesijohtovettä noin 1 cm, paine-eron minimoimiseksi, kun näytettä asetettiin mittauslaitteistoon. Mittauslaitteiston säiliön vedenkorkeus oli nostettu valmiiksi ylös, ja näytteiden asettaminen laitteistoon aloitettiin niin, että näyte laskeutui veden pinnan alle vinossa. Näin vältettiin näytteen rikkoutuminen. Sifonit täytettiin vedellä ja näytteet jätettiin tasoittumaan laitteistoon vähintään neljäksi tunniksi. Mittaus tehtiin vakiopainemenetelmällä. Hydraulinen paine määritettiin jokaiselle näytteelle erikseen mittaamalla sekä vesisäiliön että näytepidikkeen vedenkorkeus mittalaitteistossa olevalla mittarilla. Mittaus suoritettiin mittaamalla veden tilavuusvirtausta näytteen läpi. Vettä kerättiin byrettiin 1 – 15 min riippuen näytteen läpäisevyydestä. Byrettiin kertyneen veden määrä merkattiin muistiin. Mittauksen jälkeen maanäytteet punnittiin uudelleen, mahdollisen maahävikin havaitsemiseksi. Mittaustuloksista laskettiin vedenjohtavuus (K_s) Darcyn lain mukaan (Kaava 7):

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta s} \quad (7)$$

$$\Rightarrow K_s = \frac{q \times \Delta s}{\Delta H} = \frac{Q \times L}{h \times A}, \quad (8)$$

jossa

Q = tilavuusvirta eli näytteen läpi virtaavan veden määrä ajassa ($\text{cm}^3 \text{d}^{-1}$)

L = näytteen korkeus (cm)

h = vesisäiliön ja näytepidikkeen vedenkorkeuksien ero (cm)

A = näytteen poikkipinta-ala (cm^2).

5.2.3 Maan vedenpidätyskapasiteetti ja kuiva irtotiheys

Maan vedenpidätyskapasiteetti määritettiin matriisipotentialaaleissa pF 0; 0,4; 1; 2 ja 4,2 (-1 cm, -2,5 cm, -10 cm, -100 cm ja -15000 cm vesipatsasta).

Pisteet pF 0; 0,4; 1 ja 2

Mittauspisteet pF 0; 0,4; 1 ja 2 määritettiin alipainemenetelmällä. Vedenjohtavuusmittauksen jälkeen punnittua massaa käytettiin pF 0 pisteen massana. Piste pF 0,4 määritettiin tyhjässä muovilaatikossa, jonka pohja oli kevyesti sumutettu keitetyllä vedellä. Tässä oletettiin ylimääräisen veden poistuvan painovoiman vaikutuksesta, jolloin vesipatsaan korkeus näytteessä oli -2,5 cm näytteen puolivälistä tarkasteltuna. Pisteet pF 1 ja 2 määritettiin käyttäen hiekkapetiä (Eijkellkamp sandbox). Pisteessä

pF 1 hiekkapedin veden ulostulo asetettiin 10 cm näytteen keskikohdan alapuolelle, ja pisteessä pF 2 (kenttäkapasiteetti) 100 cm näytteen keskikohdan alapuolelle. Jokaisen pF-pisteen säätämisen välissä näytteet punnittiin (Precisa LS 2200C), ja näytteiden annettiin tasoittua, kunnes vedentulo oli alle 0,5 ml/vrk/näyte.

Piste pF 4,2

Piste pF 4,2 (lakastumisraja) määritettiin painekattilassa ylipainemenetelmällä. Kyllästetyistä rakennenäytteistä porattiin yhden tuuman korkkiporalla osanäytteet. Poratut rakennenäytteet kuivattiin +105 °C:ssa lämpökaapissa (Memmert) lieriöineen maan kuivamassan määrittämistä varten. Korkkiporattua osanäytettä lusikoitiin keitetyssä vedessä kyllästyneen 15 bar:n keraamisen levyn päälle asetettuihin, sentrifugiputkista sahattuihin rinkuloihin. Näytteiden päälle sumutettiin keitettyä vesijohtovettä niin, että ne liettyivät. Näytteiden annettiin seistä huoneenlämmössä kaksi tuntia, jonka jälkeen levyt asetettiin painekattilaan. Kattilan paine säädettiin nostamalla sitä hiljalleen 15 bar:iin, ja painetta tarkkailtiin päivittäin. Veden tulon tyrehdyttyä ylipaine laskettiin pois, kattila avattiin, ja rinkuloissa oleva maa punnittiin, minkä jälkeen ne kuivattiin +105 °C:ssa lämpökaapissa (Memmert) vuorokauden ajan.

Maan kuiva irtotiheys

Rakennenäyte punnittiin (Precisa LS 2200C) ennen korkkiporausta ja porauksen jälkeen, ja näiden erotusta käytettiin osanäytteen massana. Korkkiporattu rakennenäyte kuivattiin +105 °C:ssa lämpökaapissa (Memmert) kaksi vuorokautta, jonka jälkeen se punnittiin. Punnitustulosten perusteella laskettiin korkkiporatun rakennenäytteen kuiva-ainepitoisuus (ka-pitoisuus), jonka avulla saatiin laskettua poraamattoman rakennenäytteen kuiva-aine (Kaava 9):

$$\text{Poraamattoman rakennenäytteen kuiva-aine} = \text{poratun rakennenäytteen kuivamassa} + (\text{poratun näytteen ka-pitoisuus} \times \text{osanäytteen massa}) \quad (9)$$

Poraamattoman rakennenäytteen kuiva irtotiheys laskettiin poraamattoman rakennenäytteen kuiva-aineen ja lieriön tilavuuden (250 cm³) osamääränä.

5.2.4 Maanäytteiden kasvihuonekaasujen tuotto

Rakennenäytteistä määritettiin maan kasvihuonekaasujen tuotto kenttäkapasiteettikosteudessa. Koska sopivan kokoisia kaasutiiviitä kammioita kaasuntuoton tutkimiseksi ei ollut saatavilla, rakennettiin ne yhden litran hillopurkeista itse (Kuva 4). Hillopurkin metallikanteen porattiin reikä, johon asennettiin butyylikumikorkki. Kumikorkin läpi ujutettiin näytteenottoa varten neulan avulla halkaisijaltaan 2 mm kokoinen teflonletku, johon oli liitetty kolmitiehana. Koska näytteen asettelu kapean hillopurkin pohjalle sitä häiritsemättä tuotti vaikeuksia, näytteen asettamista varten 3D-tulostettiin muovinen lieriömäinen asetin (jäljempänä ”hissi”). Näyte asetettiin hissiin oikeinpäin kankaan kanssa, ja näytteen päälle asetettiin toinen kangas ja muovinen levy. Lopuksi kammio laskettiin näytteen päälle. Kammio käännettiin oikeinpäin samalla hissistä kiinni pitäen, jolloin myös lieriönäyte kääntyi ylösalaisin. Hissi ja näytteen alapinnalla oleva kangas nostettiin pois kammioista (Kuva 4).

Inkubaatio tehtiin kerrallaan kuudelle näytteelle ja kahdelle sokealle. Mittaus aloitettiin pöhöttämällä varovaisesti paineilmalla yhtä kammiota kerrallaan 10 sekunnin ajan. Kammion kansi suljettiin välittömästi ja siirryttiin tuulettamaan seuraavaa kammiota. Näin edettiin, kunnes kaikki kahdeksan kammiota oli suljettu. Kammioiden sulkemisen aloitusaika ja lopetusaika otettiin muistiin keskimääräisen inkubaatioajan määrittämiseksi. Näytteiden annettiin inkuboitua 24 tuntia, minkä jälkeen kammioista kerättiin 8 ml kaasunäyte He-huuhdeltuihin ja vakumoituihin ampulleihin (3 ml Exetainer, joissa kaksikerroksiset septumit, Labco Ltd, UK) kammion kannessa olevan kolmitiehanan kautta. Kaasunäytteistä analysoitiin hiilidioksidi-, dityppioksidi- ja metaanipitoisuudet kaasukromatografisesti (7890B GC System, Agilent). Mittauksen laatu varmistettiin mittaamalla 8 näytteen välein tunnettu näyte (kalibrointiin käytettyä kaasuseosta) sekä huoneilmanäyte.



Kuva 4. Näytteen asettaminen emissiokammioon 3-D tulostetun hissien avulla. Näyte on emissiokammiossa ylösalaisin niin, että näytteen lähempänä maan pintaa oleva puoli osoittaa alaspäin.

5.2.5 Maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti

Maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti mitattiin (KD2 Pro, Decagon Devices) rakennenäytteistä kenttäkapasiteetti- ja kyllästyskosteudessa. Mittaus suoritettiin jokaisen näytteen yläpinnalta kahdesta eri kohtaa. Testimittauksen perusteella (kivennäismaa) pidettiin jokaisen mittauksen välissä 15 min pituinen tauko, jotta anturi jäähdyi riittävästi.

5.2.6 Maan pH ja sähkönjohtavuus

Maan pH ja sähkönjohtavuus määritettiin seulotusta (\varnothing 2 mm) ilmakeivasta viljavuuskairalla otetusta maasta kolmena rinnakkaisena. Maan pH määritettiin sekä vesilietoksesta (mQ-vesi, Milli-Q Reference A+, Rios50) että 0,01 M CaCl_2 -lietoksesta uuttosuhteella 1:2,5 (v/v). Taarattuihin dekantterilaseihin mitattiin 20 ml:n maamittalla maata, joka punnittiin (Precisa XR405A-FR). Dekantterilaseihin lisättiin 50 ml:n täyspipetillä joko mQ-vettä tai 0,01 M CaCl_2 -liuosta. Lietoksia sekoitettiin voimakkaasti lasisauvalla ja jätettiin seisomaan yön yli huoneenlämpöön. Seuraavana päivänä mQ-vesilietosten nestefaasista mitattiin ensin ominaisjohtokyky (eli sähkönjohtavuus) (MeterLab, CDM210 Conductivity Meter), jonka jälkeen kaikki lietokset sekoitettiin lasisauvalla.

Lietoksista mitattiin pH elektronisella pH-mittarilla (Consort C860). Lopuksi näytteet kuivattiin lämpökaapissa (Memmert) +105 °C:ssa, kunnes kaikki neste oli haihtunut pois. Kuivat näytteet punnittiin (Precisa XR405A-FR).

5.2.7 Maan hiilipitoisuus

Maan kokonaishiilipitoisuus määritettiin kuivapolttomenetelmällä seulotusta (\varnothing 2 mm) ilmakeivasta maasta kolmena rinnakkaisena kaikista käsittelyistä. Mittaus tehtiin CN-analysaattorilla (Vario MAX CN, Elementar). Laitteen antamat kokonaishiilipitoisuudet on esitetty suhteessa maan ilmakeivaan massaan.

5.3 Laadunvalvonta ja tilastolliset analyysit

Kaasumäärittelyksissä, lämmönjohtavuuden ja -diffusiviteetin määrittelyksissä sekä vedenjohtavuus- ja vedenpidätysmäärittelyksissä kussakin kerranteessa oli mukana 6 rinnakkaisnäytettä. Lisäksi lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteettimäärittelyksissä tehtiin mittausrinnakkaiset eli lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti määritettiin samasta näytteestä kahdesta erikohtaa tehdyn mittauksen keskiarvona. Maamurujen vedenkestävyysmittaukset tehtiin kahtena rinnakkaisena. Maan kaasuntuoton määrittelyksissä jokaisessa näytteenottovaiheessa oli kaksi sokeaa näytettä (inkubaatiokammiota), ja jokaiseen kaasujen kaasukromatografiseen analyysikertaan lisättiin kaksi tunnettua näytettä ja kaksi laboratorioilmasta otettua näytettä. Maan pH- ja sähkönjohtavuusmäärittelyksissä jokaisessa mittauserässä oli mukana kaksi tunnettua näytettä (Helsingin yliopiston Maaperä- ja ympäristötieteen yksikön oma referenssimaa) ja kaksi sokeaa näytettä. Biologisen toiminnan minimoimiseksi ja kuivumisen estämiseksi rakenteellisia näytteitä säilytettiin ennen mittauksia ja mittausten välillä +5 °C:ssa kaksinkertaisissa muovipusseissa, joiden väliin oli laitettu kostutettu käsipaperi.

Tilastollinen analyysi tehtiin IBM SPSS Statistics (versio 25) -tilastoanalyysiohjelman varianssianalyysillä käyttäen satunnaistettujen lohkojen mallia ja käsittelykeskiarvojen vertailu t-testillä ($p < 0,05$). Ennen tilastoanalyysia aineiston luotettavuutta arvioitiin rinnakkaismäärittelysten hajonnan ja tulosten suuruusluokan perusteella. Murujen vedenkestävyysmittauksista muutamat

ilmeisen epäluotettavat tulokset jätettiin poikkeavina havaintoina pois tilastanalyseista (ks. tarkemmin luku 7.6).

6 Tulokset

6.1 Maamurujen vedenkestävyys ja kuiva irtotiheys

Kenttäkosteudessa murujen vedenkestävyys oli suurinta kontrollissa molemmilla seuloilla määritettynä. Kuitenkaan tulokset eivät eronneet toisistaan tilastollisesti (Taulukko 3). Ilmakuivatussa maassa murujen vedenkestävyys oli suurinta kipsisakka 3 -käsittelyllä 0,25 mm seulonnessa ja 2 mm seulonnessa kuitusavi 15 -käsittelyllä (Taulukko 3). Seulakoosta riippumatta kontrollikäsitteilyn murujen vedenkestävyys oli ilmakuivatussa maassa pienin. Kontrollikäsitteily erosi 0,25 mm märkäseulonnessa muista käsitteilyistä tilastollisesti merkitsevästi, ja 2 mm seulalla kontrolli erosi kaikista muista paitsi kipsisakka 3 -käsittelystä. Esikostutetussa maassa murujen vedenkestävyys 0,25 mm seulalla oli kaikilla käsitteilyillä hyvin samanlaista eikä käsitteilyt eronneet toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Taulukko 3). Sitä vastoin 2 mm seulalla esikostutetussa maassa oli vedenkestäviä muruja vähiten kontrollissa, ja se erosi tilastollisesti merkitsevästi kaikista muista käsitteilyistä paitsi kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittelystä.

Kaikilla käsitteilyillä ilmakuivatussa maassa murut olivat kaikkein kestävimpiä, kun taas kenttäkosteassa maassa heikoimpia. Silmäkooltaan 0,25 mm kokoisella seulalla seulottuna murut olivat kestävämpiä kuin 2 mm seulalla seulotussa maassa.

Maan kuiva irtotiheys oli pienin kipsisakka 3 käsittelyllä, ja suurin 15 + kipsisakka 3 -käsittelyllä (Taulukko 4). Kuitenkaan irtotiheydet eivät eronneet tilastollisesti merkittävästi minkään käsitteilyn kesken.

Taulukko 3. Vedenkestävien murujen osuus ja rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhe käsittelyittäin eri kosteuksissa silmäkooltaan 0,25 mm ja 2 mm märkäseulottuna. Koejäsenten väliset tilastolliset merkitsevyyserot ($p < 0,05$) kussakin kosteudessa on esitetty silmäkooltaan 0,25 mm märkäseulalla pienin kirjaimin ja 2 mm isoin kirjaimin.

Käsittely	Seula	Kenttäkosteus		Ilmakuiva		Esikostutettu	
Kontrolli	0,25 mm	83,7 ±	2,0 ^a	91,63 ±	1,7 ^a	84,9 ±	1,7 ^a
	2 mm	66,9 ±	2,3 ^A	90,71 ±	0,7 ^A	67,7 ±	3,5 ^A
Kipsisakka 3	0,25 mm	77,3 ±	5,6 ^a	97,88 ±	0,3 ^b	87,1 ±	2,5 ^a
	2 mm	57,7 ±	4,8 ^A	94,23 ±	0,6 ^{A,B}	88,9 ±	0,8 ^B
Kuitusavi 15	0,25 mm	78,2 ±	1,0 ^a	96,68 ±	0,3 ^b	90,2 ±	3,1 ^a
	2 mm	58,4 ±	2,0 ^A	96,22 ±	0,2 ^B	90,3 ±	3,2 ^B
Kuitusavi 15 + kipsisakka 3	0,25 mm	77,9 ±	2,3 ^a	96,36 ±	0,9 ^b	90,7 ±	2,2 ^a
	2 mm	64,5 ±	3,7 ^A	94,97 ±	1,4 ^B	78,2 ±	5,1 ^{A,B}
Kuitusavi 3	0,25 mm	74,5 ±	2,0 ^a	96,97 ±	0,4 ^b	90,0 ±	1,0 ^a
	2 mm	61,8 ±	3,1 ^A	95,96 ±	0,7 ^B	88,4 ±	2,2 ^B

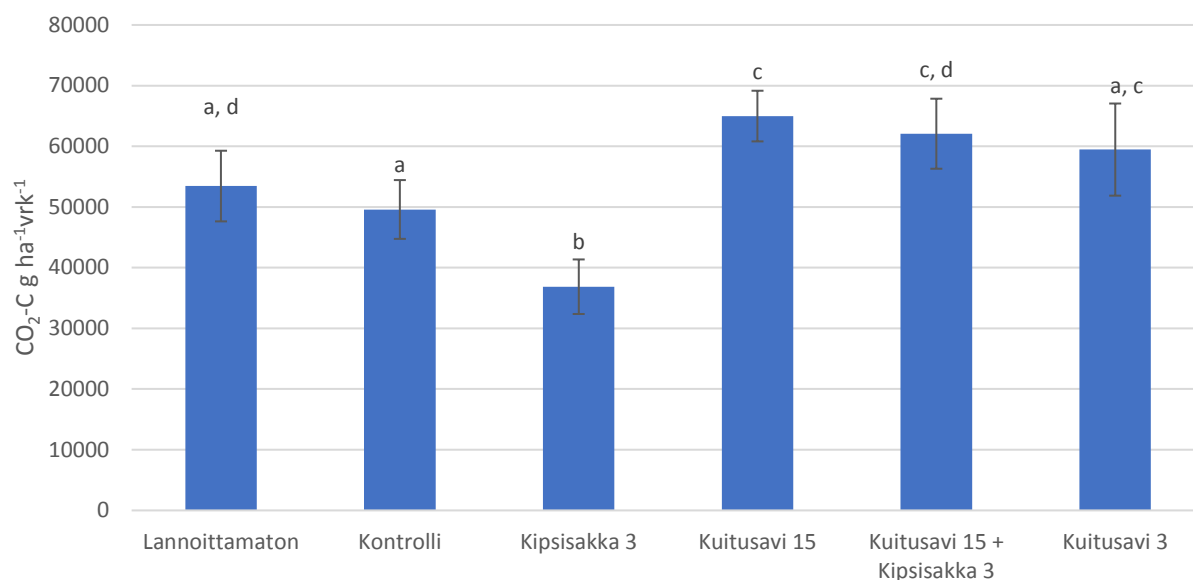
Taulukko 4. Turvemaan kuiva irtotiheys ja rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhe käsittelyittäin. Koejäsenten väliset merkitsevät erot ($p < 0,05$) on esitetty kirjaimin.

Käsittely	Kuiva irtotiheys, g cm ⁻³
Lannoittamaton	0,210 ± 0,022 ^a
Kontrolli	0,203 ± 0,023 ^a
Kipsisakka 3	0,198 ± 0,011 ^a
Kuitusavi 15	0,210 ± 0,014 ^a
Kuitusavi 15 + kipsisakka 3	0,213 ± 0,030 ^a
Kuitusavi 3	0,199 ± 0,019 ^a

6.2 Maan hiilidioksidin, dityppioksidin ja metaanin tuotto

Hiilidioksidin tuotto oli suurinta kaikilla kuitusavea sisältävillä käsittelyillä, joiden välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa (Kuva 5). Kuitusavi 15 erosi tilastollisesti merkittävästi sekä lannoittamattomasta kontrollikäsittelystä että lannoitetusta kontrollikäsittelystä, kun taas kuitusavi 15

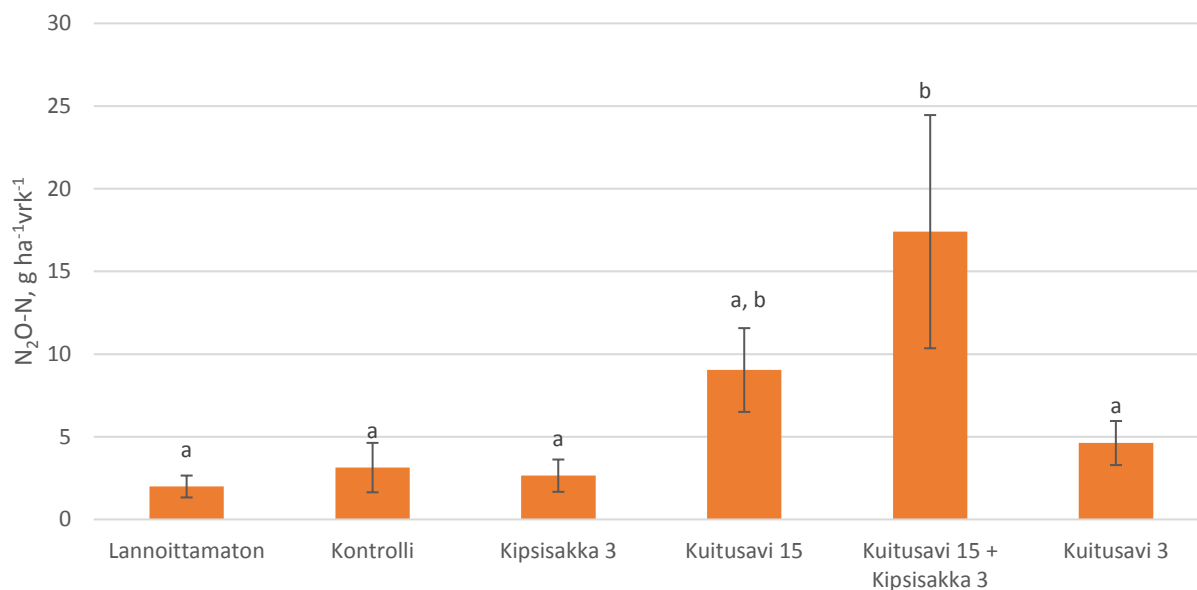
+ kipsisakka 3 erosi merkittävästi vain lannoitetusta kontrollista. Hiilidioksidin tuotto oli pienintä kipsisakka 3 -käsittelyllä, ja se erosi tilastollisesti merkitsevästi kaikista muista käsittelyistä.



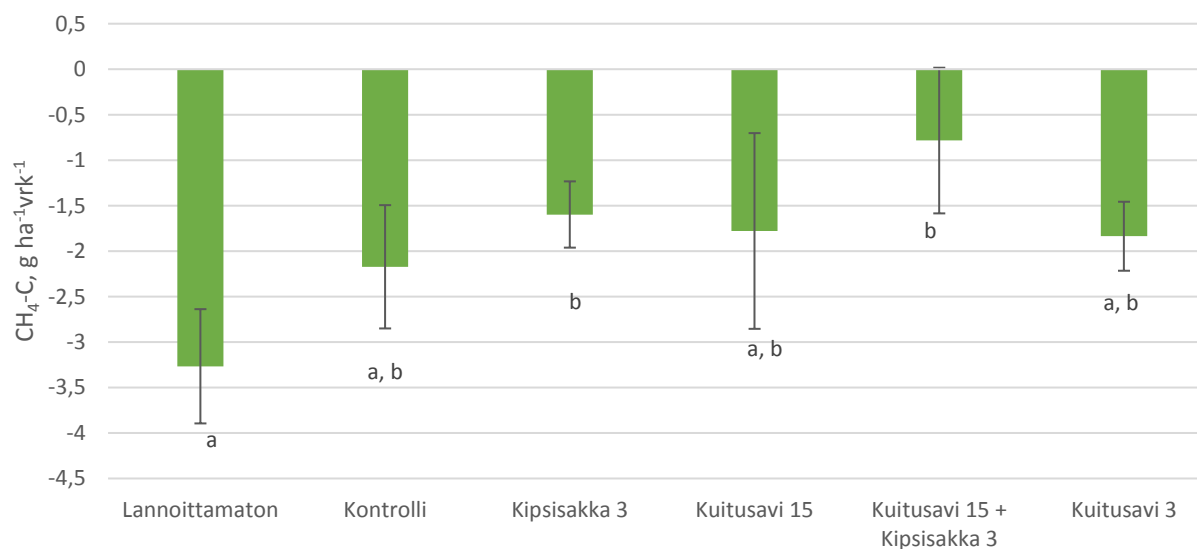
Kuva 5. Hiilidioksidituotto eri maanparannusainekäsittelyillä kenttäkapasiteettia (pF 2) vastaavassa kosteudessa. Pylväiden päällä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty kuvassa eri kirjaimin.

Dityppioksidin tuotto oli pienintä lannoittamattomalla kontrollilla, kontrollilla, kipsisakka 3:lla ja kuitusavi 3:lla, ja ne eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Kuva 6). Korkein dityppioksidin tuotto oli kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittelyllä, ja se erosi tilastollisesti merkitsevästi kaikista muista käsittelyistä paitsi kuitusavi 15 kg m⁻². Kuitusavi 15 ei eronnut muista koejäsenistä merkittävästi.

Metaanin tuotto oli kaikilla käsittelyillä negatiivinen (Kuva 7). Lannoittamattomaan käsittelyyn verrattuna metaanin kulutus väheni sekä kontrollilla että muilla maanparannuskäsittelyillä, mutta vain kipsisakkaa sisältävät käsittelyt erosivat tilastollisesti merkitsevästi lannoittamattomasta. Muiden koejäsenten välillä tilastollista merkitsevyyseroa ei ollut.



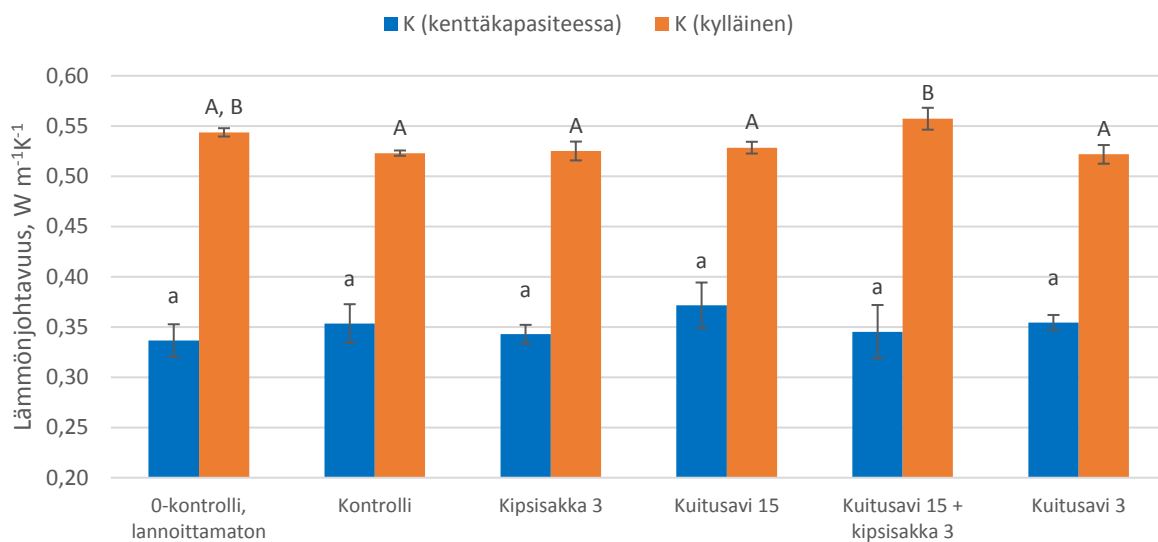
Kuva 6. Dityppioksidin tuotto eri maanparannusainekäsittelyillä kenttäkapasiteettia (pF 2) vastaavassa kosteudessa. Pylväiden päällä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty kuvassa eri kirjaimin.



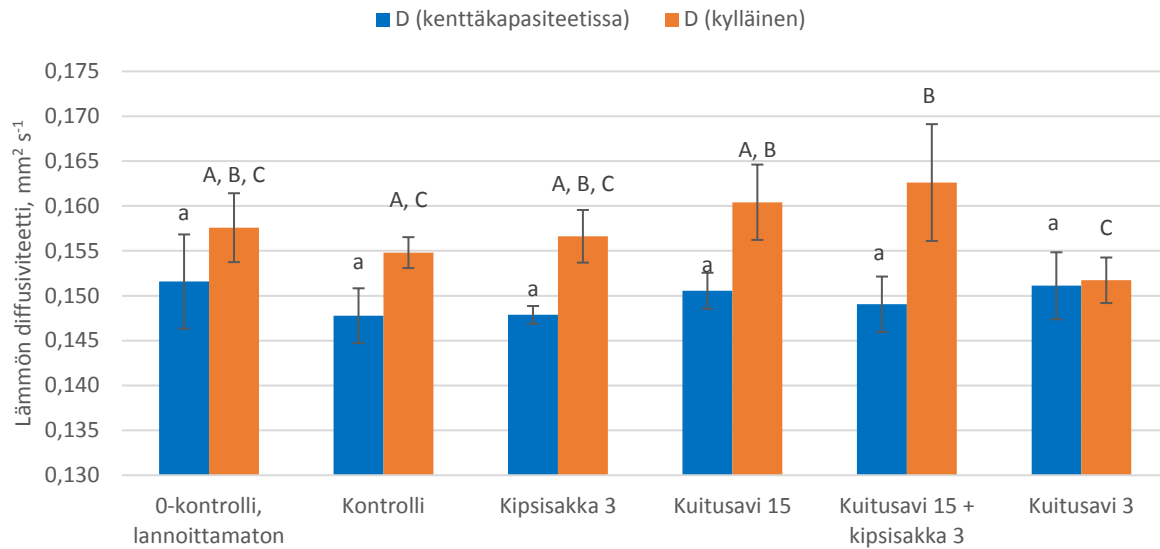
Kuva 7. Metaanin kulutus eri maanparannusainekäsittelyillä kenttäkapasiteettia (pF 2) vastaavassa kosteudessa. Pylväiden päällä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty kuvassa eri kirjaimin.

6.3 Maan lämpöominaisuudet

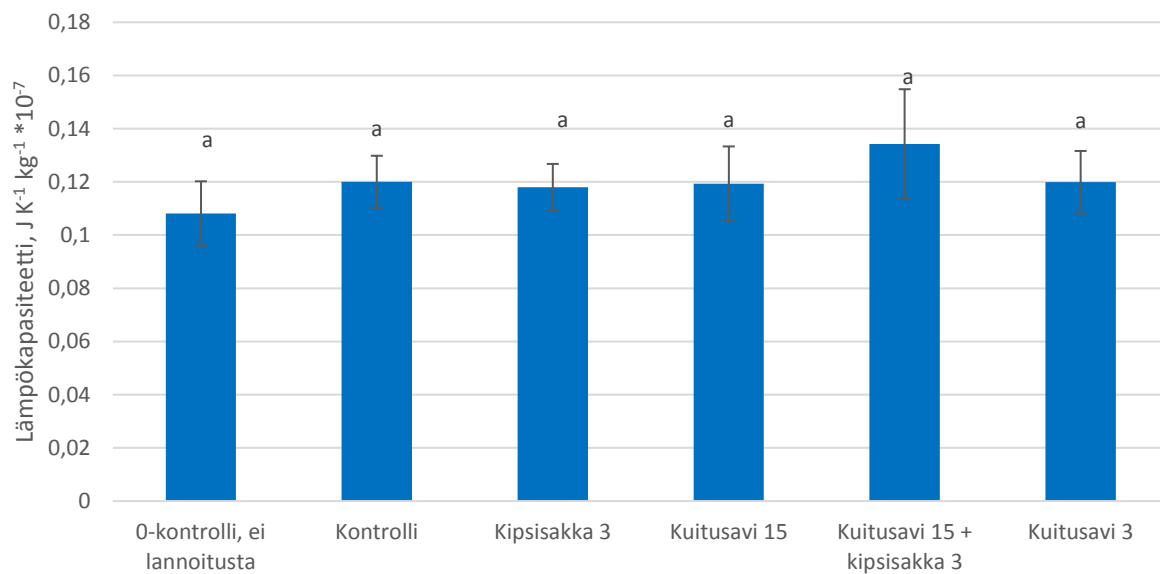
Kenttäkapasiteetikosteudessa (pF 2) maan lämmönjohtavuus tai -diffusiviteetti eivät vaihdelleet eri käsittelyjen välillä (Kuva 8 ja 9). Veden kyllästävässä maassa kuitusavi 15 + kipsisakka 3:n lämmönjohtavuus erosi kaikista muista käsittelyistä paitsi lannoittamattomasta. Lämmöndiffusiviteetti veden kyllästävässä maassa vaihteli hiukan, mutta tilastollisesti merkitsevää eroa lannoittamattomaan kontrollikäsittelyyn ei ollut. Lannoitettuun kontrollikäsittelyyn verrattuna vain kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittely erosi merkitsevästi (Kuva 9). Kuitusavi 3 erosi tilastollisesti merkitsevästi 15 kuitusavea sisältävistä käsittelyistä. Kenttäkapasiteetissa lämpökapasiteetti ei vaihdellut eri käsittelyjen välillä (Kuva 10).



Kuva 8. Lämmönjohtavuus eri käsittelyjen välillä kenttäkosteudessa ja veden kyllästäminä. Pylväissä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Koejäsenten väliset tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) on esitetty kenttäkosteudessa pienin kirjaimin ja veden kyllästäminä isoin kirjaimin



Kuva 9. Lämmön diffusiviteetti eri käsittelyjen välillä kenttäkosteudessa ja veden kyllästäminä. Pylväissä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Koejäsenten väliset tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) on esitetty kenttäkosteudessa pienin kirjaimin ja veden kyllästäminä isoin kirjaimin.

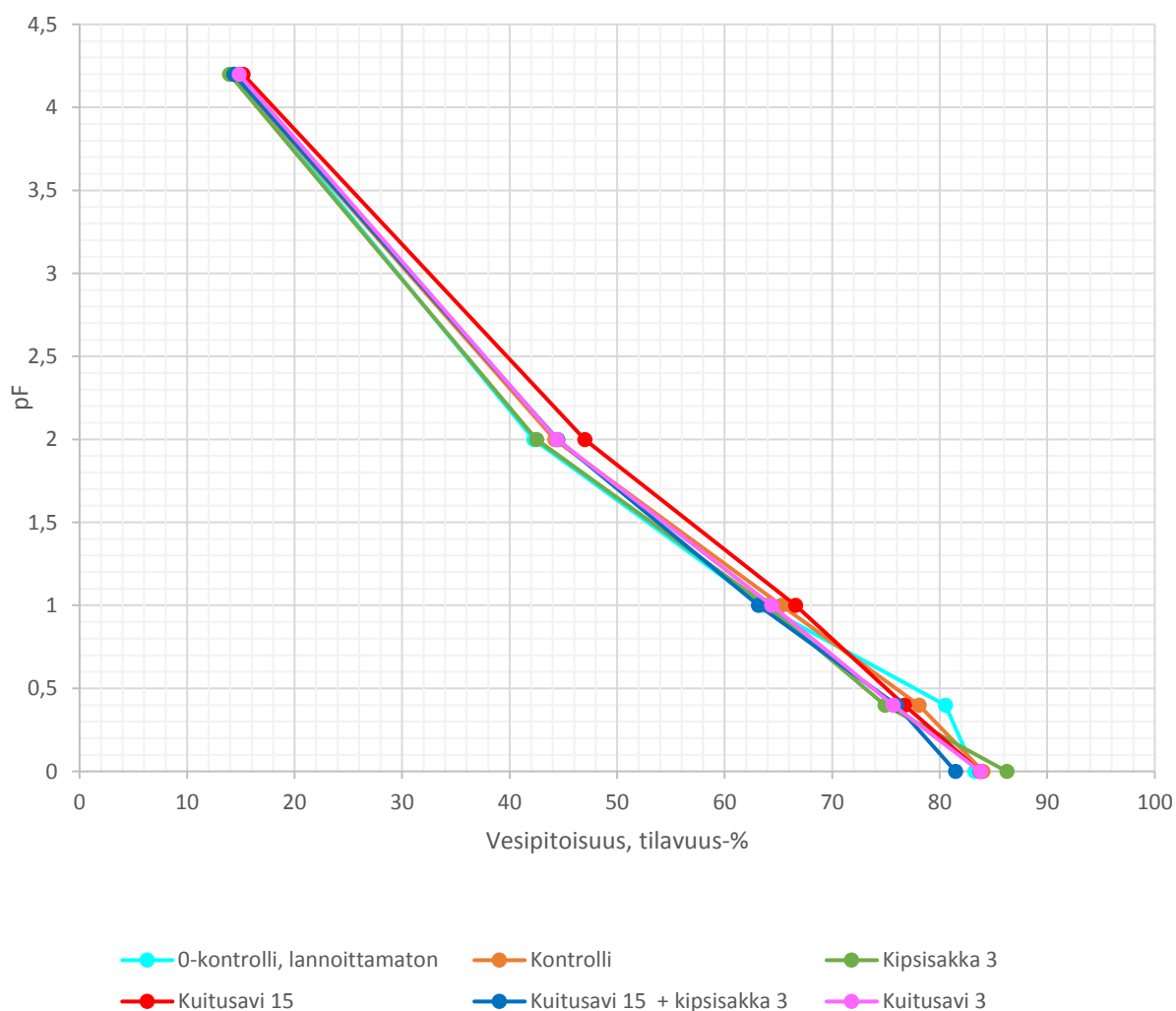


Kuva 10. Lämpökapasiteetti kenttäkosteudessa. Pylväissä olevat janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty kuvassa eri kirjaimin.

Lämmönjohtavuusmittauksissa maan lämpötila eri käsittelyjen välillä oli 19,9 - 20,4 °C kenttäkapasiteetissa. Veden kyllästämän maan lämpötila oli 17,5 - 18,3 °C. Tilastollista merkitsevyyttä eri käsittelyjen välillä kummassakaan kosteudessa ei ollut.

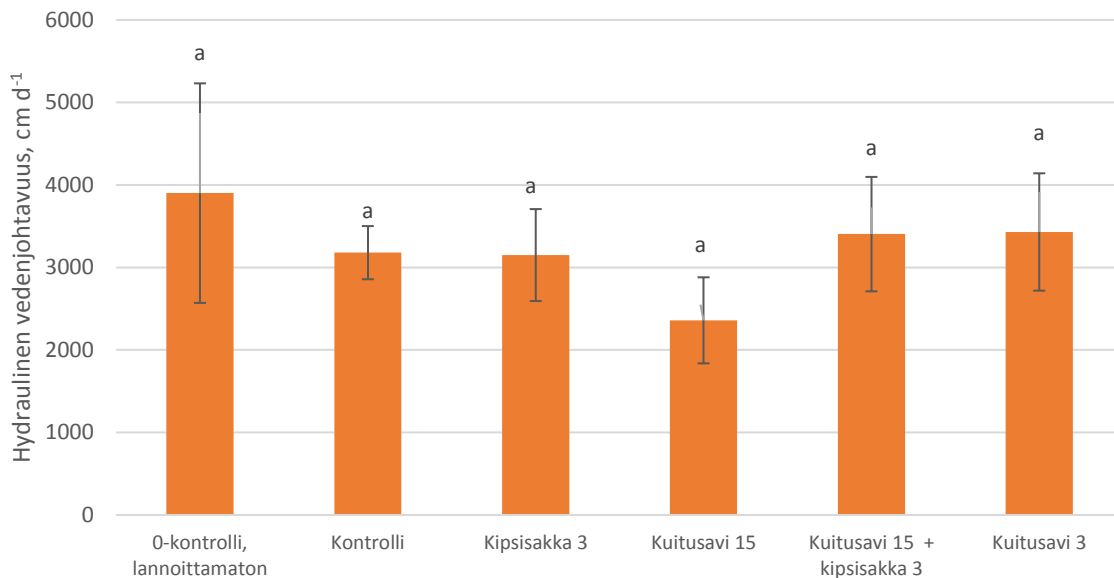
6.3 Vedenpidätyskapasiteetti ja kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus

Vedenpidätyskapasiteetti oli kussakin pF-pisteessä samaa luokkaa kaikilla käsittelyillä. Kenttäkapasiteetissa (pF 2) ja sitä alemmissa pF-pisteissä vesipitoisuuksissa oli enemmän vaihtelua, kun taas lakastumisrajalla (pF 4,2) arvot olivat hyvin samankaltaiset kaikilla käsittelyillä (Kuva 11). Kuitenkaan missään pF-pisteessä ei havaittu tilastollisesti merkittävää eroa ($p < 0,05$) koejäsenten välillä.



Kuva 11. Maan vedenpidätyskäyrä käsittelyittäin.

Kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus oli suurin lannoittamattomalla kontrollilla ja pienin käsittelyssä kuitusavi 15 (Kuva 12). Koejäsenten välillä ei kuitenkaan havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa.



Kuva 12. Kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus käsittelyittäin. Pylväiden päällä olvet janat kuvaavat rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhettä. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty kuvassa eri kirjaimin.

6.4 Maan pH, johtoluku ja kokonaishiilipitoisuus

Kontrolli- ja kipsisakka 3 -käsittelyillä maan pH oli selvästi matalampi kuin kuitusavea sisältävillä käsittelyillä, ja ne erosivatkin tilastollisesti merkitsevästi kuitusavea sisältävistä käsittelyistä (Taulukko 5). Kuitusavi 15 -käsittelyllä maan pH oli korkein. Korkeimmat johtoluvut olivat kipsisakkaa sisältävillä käsittelyillä, ja ne erosivat muista käsittelyistä tilastollisesti merkitsevästi (Taulukko 5). Maan kokonaishiilipitoisuus ei vaihdellut käsittelyjen kesken (Taulukko 6).

Taulukko 5. Maan pH määritettynä H₂O- ja CaCl₂-lietoksista sekä johtoluku (H₂O) (uuttosuhde v/v 1:2,5). Koejäsenten väliset tilastollisesti merkitsevät erot ($p < 0,05$) käsittelyjen välillä on esitetty taulukossa eri kirjaimin.

Käsittely	pH		Johtoluku
	H ₂ O	CaCl ₂	H ₂ O
Kontrolli	5,01 ^a	4,44 ^a	1,57 ^a
Kipsisakka 3	4,81 ^a	4,79 ^a	14,43 ^b
Kuitusavi 15	7,17 ^b	6,76 ^b	2,85 ^a
Kuitusavi 15 + kipsisakka 3	6,72 ^b	6,43 ^b	16,08 ^b
Kuitusavi 3	6,90 ^b	6,47 ^b	2,57 ^a

Taulukko 6. Maan kokonaishiilipitoisuus ja rinnakkaisnäytteiden (n=3) keskiarvon keskivirhe käsittelyittäin. Koejäsenten väliset merkitsevät erot ($p < 0,05$) on esitetty kirjaimin.

Käsittely	Kokonaishiilipitoisuus, C % [*]		
Lannoittamaton	37,80	±	3,0 ^a
Kontrolli	37,79	±	4,2 ^a
Kipsisakka 3	34,68	±	1,8 ^a
Kuitusavi 15	34,40	±	1,2 ^a
Kuitusavi 15 + kipsisakka 3	33,66	±	0,3 ^a
Kuitusavi 3	37,87	±	1,3 ^a

^{*} Kokonaishiilipitoisuus on esitetty suhteessa maan ilmakeivaan massa.

7 Tulosten tarkastelu

Tutkimuksia kuitusaven tai muiden puukuituisten maanparannusaineiden käytöstä viljelykäytössä olevilla turve- tai multamailla ei ole saatavilla. Tämän vuoksi tulosten tarkastelussa kuitusaven maanparannusvaikutuksia verrataan viljellyillä kivennäismailla tehtyihin tutkimuksiin. Maanparannuskäsittelyiden hyötyjä viljeltyjen turvemaiden yleisten ongelmien (heikko kantavuus, kasvihuonepäästöt, kylmyys ja happamuus) ratkaisemiseen arvioidaan omien mittausten ja kirjallisuuden perusteella.

7.1 Maanparannusaineiden vaikutus turvemaan rakenteen kestävyteen ja tiiviyyteen

Työn hypoteesina oli, että maanparannusaineiden käyttö parantaa maan murujen vedenkestävyyttä. Hypoteesin vastaisesti kenttäkosteudessa maanparannusaineiden lisäyksellä ei ollut merkitystä murujen vedenkestävyyteen kontrolliin verrattuna kummallakaan seulakoolla määritettynä, suurista levitysmääristä huolimatta. Verrattaessa kenttäkosteudessa mitattujen kuitusaven tuloksia kivennäismailla tehtyihin kuitulevityskokeisiin, tulokset olivat osittain samankaltaisia. Chowin ym. (2002) tutkimuksessa primäärisen kuidun käyttö kasvatti suurten murujen (\emptyset 1 - 5 mm) vedenkestävyyttä, kun taas pienten murujen ei. Samankaltaisia tuloksia sain myös Bipfubusa ym. (2005), kun 40 Mg ha^{-1} kuitulisäys paransi halkaisijaltaan yli 5 mm kokoisten murujen vedenkestävyyttä. Myös 24 Mg ha^{-1} kivennäismaalle lisätty siirustauslietemäärä paransi murujen vedenkestävyyttä, ja toisen siirustauslieteläisäyksen jälkeen murujen vedenkestävyys parani 15 % verrattuna käsittelemättömään kontrolliin (Nemati ym. 2000a). Siirustauslieteläisäys kasvatti halkaisijaltaan 2-4 mm kokoisten murujen osuutta verrattuna kontrolliin, mutta sitä pienempiin muruihin sillä ei ollut vaikutusta (Nemati ym. 2000b).

Tässä tutkimuksessa turvemurujen kontrollikäsitteilyä heikompi vedenkestävyys kenttäkosteudessa kuitusaviläisäyksellä saattaa johtua myös mikrobiologisen äktiivisuuden kasvamisesta, sillä kuitusaven on todettu kasvattavan maan mikrobiologista äktiivisuutta (Chantigny ym. 2000; Nemati ym. 2000a), minkä seurauksena turvemurujen orgaaninen aines hajoaa nopeammin. Toisaalta maan mikrobiologisen äktiivisuuden kasvaessa myös mikrobien tuottamien, maamuruja toisiinsa sitovien äineiden määrä kasvaa (Tisdall ja Oades 1982). Siten nopeasti hajoavan orgaanisen äineksen läisäys maahan parantaa maan rakennetta.

Kipsisäkkäkäsitteilyn tulokset olivat samankaltaisia kuin Teho-hankkeessa (Kulmala 2011), missä kipsikäsitteily 4 Mg ha^{-1} ei vaikuttanut murujen vedenkestävyyteen kivennäismailla. Myöskään Coxin ym. (2005) tutkimuksessa kipsiläisäys 15 Mg ha^{-1} ei kasvattanut halkaisijaltaan yli 2 mm ja alle 0,25 mm kokoisten murujen vedenkestävyyttä kuin vain hiukan, mutta kokoluokaltaan näiden väliin jääviin muruihin kipsillä ei ollut vaikutusta. Sen sijaan Hamzan ja Andersonin (2003) tutkimuksessa kipsin käyttö ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) paransi murujen vedenkestävyyttä. Kipsisäkkäkäsitteilyn kontrollia alhaisemmat murujen vedenkestävyydet saattavat aiheutua sen vaikutuksesta maan biologiseen

aktiivisuuteen. Lieroilla kipsilisäyksen ($50 - 150 \text{ g kg}^{-1}$ maata) on todettu aiheuttavan niin pigmenttimuutoksia kuin epiteelin repeytymiä (Samal ym. 2017). Nayak ym. (2011) havaitsivat, että mikrobien entsyymiaktiivisuus on suurinta alle 15 % kipsilisäyksillä. Toisaalta Mattilan ym. (2019) mukaan 4 Mg ha^{-1} kipsilisäys ei vaikuttanut mikrobiaktiivisuuteen. Tässä tutkimuksessa kipsilisäys oli kuitenkin 6,5 kertaa suurempi kuin Mattilan ym. (2019). Myös hiilidioksidin tuotannon (jäljempänä) perusteella maan mikrobiaktiivisuus oli kipsisakkakäsittelyn seurauksena laskenut.

Tulosten perusteella turpeen kuivumisella oli enemmän merkitystä maamurujen vedenkestävyyteen kuin maanparannusaineilla, sillä ilmakeivattujen murujen vedenkestävyys ei vaihdellut maanparannusaineiden tai niiden levitysmäärien välillä. Kuivuminen luo turvemaille tyypillisiä moorsheja eli kutistumisesta palautumattomia kestäviä muruja. Bipfubusan ym. (2008) tutkimuksessa 40 Mg ha^{-1} kuitulisäys paransi kivennäismaalla halkaisijaltaan yli 2 mm kokoisten, ilmakeivattujen murujen vedenkestävyyttä 15 % verrattuna kontrolliin. Maan kuivuminen on yksi tärkeimmistä maan mururakenteen muodostajista. Maan kuivuminen stabiloi muruja (Caron ym. 1996), sillä maahiukkasten ympärillä oleva vesifilmi kutistuu, jolloin hiukkaset pääsevät lähemmäksi toisiaan, ja liittyvät toisiinsa elektrostaattisin voimin. Turvemurujen kuivuessa niiden pinnan hydrofobisuus kasvaa (Michel ym. 1999; Caron ja Rivière 2003), ja ne painuvat kokoon. Kutistuminen on palautumatonta (Oleszczuk ja Brandyk 2008). Maan kutistumisesta johtuvan huokoskoon pienenemisen ja kuivumisesta johtuva murun pinnan hydrofobisuuden kasvun tiedetään hidastavan veden imeytymistä muruun. Tällöin murun sisälle jääneen ilman paineen nousu ja veden aiheuttama murun epätasainen paisuminen hitaampaa. Tämä näkyy tuloksissa siten, että esikostutetut murut olivat kestävämpiä kuin kenttäkosteate murut. Toisaalta ilmakeivatun maan suuri murujen vedenkestävyys selittyy osin sillä, että märkäseulontavaiheessa murut kelluivat veden pinnalla, ja osa muruista ei päässyt kauttaaltaan kosketuksiin veden kanssa kolmen minuutin seulonnan aikana (Kuva 13).



Kuva 13. Ilmakuivia turvemaamuruja kellumassa veden pinnalla märkäseulontalaitteessa.

Sekä kipsisakka että kuitusavi sisälsivät runsaasti kalsiumia (160 000 ja 170 000 mg kg⁻¹ kuivaainetta). Polyvalenttisten kationien, kuten Ca²⁺ on todettu muodostavan kationisiltoja orgaanisen aineksen makromolekyylien välille, vakauttaen maan rakennetta (Oades 1988). Tulosten perusteella halkaisijaltaan yli 0,25 mm kokoisten murujen suurempi vedenkestävyys verrattuna halkaisijaltaan yli 2 mm muruihin saattaa selittyä kipsisakan ja kuitusaven sisältämällä kalsiumpitoisuudella. Oletuksena oli myös, että kuitusaven nostaessa maan pH:ta, Ca²⁺-ionit muodostaisivat kalsiumsiltoja orgaanisen aineksen kationinvaihtopaikkojen välille tehokkaammin kuin mitä kipsisakan, jolla kalkitusvaikutusta ei ollut. Tämän mekanismin merkitys lienee kuitenkin hyvin vähäinen, sillä kuitusavi ei näyttänyt vaikuttavan murujen vedenkestävyyteen yhtään sen paremmin kuin kipsisakka.

Bipfubusan ym. (2008) mukaan kuitujen vaikutus murujen kestävyys on havaittu vielä kahden vuoden jälkeen kuitujen lisäyksestä, kun taas Nematn ym. (2000a) mukaan siirustulietteen vaikutus maan murujen kestävyys kesti alle vuoden. Siirustulietteen säännöllinen lisäys kuitenkin ylläpitää maan murujen vedenkestävyyttä parantavaa vaikutusta (Nematn ym. 2000a). Nematn ym. (2000a) tutkimuksen siirustulietteen lyhytkestoinen vaikutus murujen vedenkestävyyteen saattaa olla seurausta siirustulietteen mukana lisätystä typpirikasta sekundäärisestä lietteestä. Typpilannoituksen on osoitettu vähentävän murujen kestävyys (Brtnický ym. 2017). Esimerkiksi 160 kg N ha⁻¹ mineraalityppilannoitus heikensi suurten murujen kestävyys kivennäismaalla verrattuna pelkkään kuitulisäykseen (40 Mg ha⁻¹) tai lannoittamattomaan kontrolliin (Bipfubusa ym. 2008). Myös 120 kg N ha⁻¹ typpilisä yhdessä kuidun kanssa vähensi suurten murujen kestävyys (Bipfubusa ym. 2005). Tämän vuoksi murujen vedenkestävyys olisi ollut hyödyllistä määrittää myös

lannoittamattomasta kontrollista, jotta olisi saatu tietää, olisiko perunan typpipitoisella solunesteellä lannoitettujen koejäsenten murut olleet heikompia.

Tässä tutkimuksessa maanparannusaineilla tai niiden levitysmäärillä ei ollut vaikutusta maan kuivaan irtotiheyteen. Kivennäismailla tehdyissä tutkimuksissa, primäärikuidun, siistauslietteen ja kipsin käyttö laski maan irtotiheyttä (Nemati ym. 2000a; Nemati ym. 2000b; Chow ym. 2002; Mattila ym. 2019). Se, että maan kuiva irtotiheys ei laskenut tässä tutkimuksessa maan irtotiheyttä johtuu siitä, että turvemaata oli jo ennestään hyvin löyhää. Tässä tutkimuksessa turve ei ollut silmämääräisesti havainnoituna kovin pitkälle hajonnutta, minkä perusteella maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta irtotiheyteen. Kuitenkin mineralisoitumisen edetessä ja maatumisasteen kasvaessa turpeen rakenne yksipuolistuu, maa tiivistyy ja sen irtotiheys kasvaa, jolloin maanparannusaineilla voi olla enemmän vaikutusta maan rakenteeseen.

7.2 Maanparannusaineiden vaikutukset maan kasvihuonekaasupäästöihin

Työn hypoteesina oli, että maanparannusaineiden käytöllä voidaan vähentää maan hiilidioksidin- ja dityppioksidipäästöjä. Kuitusaven suuremman levitysmäärän (15 kg m^{-2}) lisäys turvemaahan kasvatti maan hiilidioksidipäästöjä verrattuna lannoitettuun ja lannoittamattomaan kontrollikäsitteilyyn, minkä perusteella maan orgaanisen aineksen mineralisaatio kiihtyi. Tämä tulos oli hypoteesin vastainen. Kuitenkaan maan kokonaishiilipitoisuus ei maassa ollut vähentynyt kuitusavikäsitteilyillä tilastollisesti merkittävästi. Sen sijaan pienempi kuitusaven käyttö ei vaikuttanut tilastollisesti merkittävästi hiilidioksidipäästöihin verrattuna lannoittamattomaan ja lannoitettuun kontrollikäsitteilyyn. Hiilidioksidin tuotanto mitattiin kosteista rakennenäytteistä inkubaation aikana, kun taas hiilipitoisuus mitattiin kuivatusta turpeesta. Tällöin käsitteilyjen vaikutukset maan hiilipitoisuuteen ja hiilidioksidin tuottoon eivät välttämättä ole tarkasti vertailtavissa, sillä rakennenäytteiden hiilipitoisuus oli saattanut muuttua näytteistä tehtyjen mittausten aikana verrattuna kuivattuun maanäytteeseen.

Kuitusaven käyttö kasvattaa maan mikrobien biomassaa ja aktiivisuutta (Chantigny ym. 2000), mikä tukee tämän tutkimuksen kasvanutta hiilidioksidin tuotantoa suuremmalla kuitusavilisäyksellä. Kuitusaven kasvanutta hiilidioksidin tuottoa tukee myös muutokset maan happamuudessa. Maan

pH:n noustessa kuitusaven kalkitusvaikutuksen takia, voidaan olettaa, että orgaanista ainesta hajottaa enimmäkseen bakteerit. Bakteerit hajottavat orgaanista ainesta tehokkaammin kuin sienet, minkä vuoksi hiilidioksidipitoisuus kasvoi kuitusavikäsittelyssä enemmän kuin kontrollikäsittelyssä, jossa vallitsi happamat olosuhteet. Sen sijaan Marouanin ym. (2020) mukaan kuitusaven käyttö emäksisissä olosuhteissa vähensi hiilidioksidin tuottoa. Tässä tutkimuksessa tämä ei kuitenkaan pitänyt paikkaansa, sillä lievästi emäksisellä käsittelyllä (kuitusavi 15) hiilidioksidin tuotto oli suurinta. Tämän tutkimuksen kuitusavikäsittelyiltä saadut hiilidioksidituotot olivat samaa luokkaa kuin mitä Faubertin ym. (2019) tutkimuksessa.

Hypoteesin mukaisesti kipsisakan käyttö puolestaan laski hiilidioksidin tuotantoa turvemaassa, kuten tapahtui myös Osmo-hankkeessa (Mattila ym. 2019). Alhainen pH ja korkea ionipitoisuus inhiboivat mikrobiologista toimintaa kivennäismailla (Rietz & Haynes 2003; Aciego Pietri & Brookes 2008), mikä saattaa selittää kipsisakka 3:n alhaisen hiilidioksidituotannon. Myös Whittinghill ja Hobbie (2012) havaitsivat matalan pH:n inhiboivan hiilidioksidin tuottoa. Matalassa pH:ssa (4–5) maan orgaaninen aines on vähemmän liukoisessa muodossa (Shen 1999), jolloin se on heikommin mikrobien käytettävissä (Whittinghill ja Hobbie 2012). Korkealla ionipitoisuudella (Machado ja Serralheiro 2017) ja matalalla pH:lla voi kuitenkin olla haitallisia seurauksia viljelykasvien kasvuun. Whittinghill ja Hobbie (2012) havaitsivat myös korkean kalsiumpitoisuuden vähentävän CO₂-tuottoa. Ca²⁺-ionit muodostavat kalsiumsiltoja orgaanisen aineksen välille, parantaen maan rakennetta ja vähentäen orgaanisen aineksen saatavuutta mikrobien käyttöön (Whittinghill ja Hobbie 2012). Kuitusavea sisältävien käsittelyiden kipsisakkaa korkeammat hiilidioksidin tuotot saattavat johtua kuitusaven korkeasta orgaanisen aineksen pitoisuudesta, siitä huolimatta, että kuitusaven kalsiumpitoisuus oli 6,3 % suurempi kuin kipsisakan. Kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittelyllä ionipitoisuus oli korkein, mutta maan pH kasvanut, ja hiilidioksidituotanto oli korkea. Tämän perusteella maan pH:lla on suurempi merkitys mikrobiologiseen aktiivisuuteen kuin ionipitoisuudella.

Dityppioksidipitoisuuksissa osa tuloksista oli yli 100-kertaisia muihin saman koeruudun tuloksiin verrattuna. Nämä epäilyttävän korkeat tulokset päätettiin hylätä. Kontrollikäsittelystä jätettiin pois kaksi rinnakkaista ja kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittelystä yksi. Kuitusavi 15 + kipsisakka 3 -käsittelyn keskiarvon keskihajonta jäi silti hyvin suureksi, mikä edelleen herättää epäilyksiä tulosten luotettavuudesta.

Hypoteesin vastaisesti maanparannusaineet joko kasvattivat dityppioksidin tuottoa tai eivät vaikuttaneet siihen lainkaan. Kuitusavi nosti dityppioksidin tuottoa, vaikka vain kuitusaven ja kipsisankan yhteisvaikutuksella saatiin tilastollisesti merkittävät erot. Kuitusavi sisältää paljon liukoista orgaanista hiiltä (Kuokkanen ym. 2019), josta heterotrofiset denitrifikaatiobakteerit ovat riippuvaisia (Senbayram ym. 2012; Paasonen-Kivekäs 2016, s.196). Myös Baggs ym. (2002) havaitsivat tutkimuksessaan kuitusaven käytön kasvattavan maan N_2O -tuottoa. Sen sijaan Chantignyn ym. (2013) tutkimuksessa siistauslietteen käyttö ei kasvattanut N_2O tuottoa kivennäismaalla, vaan aiheutti typen immobilisoitumista. Vähäiset N_2O -tuoton nopeudet lannoittamattomassa sekä kontrolli- ja kipsisakkakäsittelyissä saattavat selittyä matalalla pH:lla, sillä Stevensin ym. (1998) mukaan N_2O -tuotto on yleisesti suurinta neutraaleissa tai hieman happamissa olosuhteissa. Kuitusavi 3-käsittelyn kalkitusvaikutuksesta huolimatta sen N_2O -tuotto oli matala. Maan lämpötila vaikuttaa myös maan N_2O -tuottoon niin, että lämpötilan noustessa maan mikrobiologinen aktiivisuus, ja siten myös hapen kulutus kasvaa. Tässä tutkimuksessa kenttäkapasiteetissa mitatut maan lämpötilat olivat kaikilla käsittelyillä yhtä korkeat, minkä vuoksi lämpötilan vaikutus kuitusavi 15- ja kuitusavi 15+kipsisakka 3 -käsittelyiden korkeampien N_2O -tuottojen osalta voidaan sulkea pois.

Kuitusavea on aikaisemmin käytetty kaatopaikkojen ja liikuntapaikkojen tiivistysmateriaalina (Metsä Tissue 2020). Se siis tiivistyy helposti. Maan tiivistyessä hapen ja muiden kaasujen diffundoituminen maan läpi heikkenee, ja maan N_2O -tuotto kasvaa (Sitaula ym. 2000). Kuitenkaan kuivan irtotiheyden perusteella kuitusavea sisältävillä käsittelyillä maa ei ollut tiivistynyt maan pintakerroksesta, minkä perusteella ei voida selittää kuitusavi 15- ja kuitusavi 15+kipsisakka 3 -käsittelyiden korkeampia N_2O -tuottoja. Toisaalta kuiva irtotiheys määritettiin pintamaasta (5–15 cm), perunapenkkiä päältä, missä voimakas muokkaus oli kuohkeuttanut maata. Käytettäessä kuitusavea toistuvasti maanparannusaineena, olisi hyvä tutkia sen tiivistymisvaikutuksia syvemmissä maakerroksissa.

Kasvihuonekaasujen määrittäminen rakenninäytteistä tehtiin kenttäkapasiteetissa, missä näytteiden vesipitoisuus oli noin 45 til-%. Metaania kului, koska olosuhteet pysyivät aerobisina inkubaation ajan. Kenttäkapasiteetissa lannoittamattoman käsittelyn vesipitoisuus oli alhaisin, mikä tukee metaanin suurinta kulutusta lannoittamalla käsittelyllä. Tulosten perusteella maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta metaanin kulutukseen verrattuna kontrolliin. Sen sijaan perunan solunesteen käyttö lannoitteena vähensi metaanin kulutusta. Steudlerin ym. (1989) mukaan typpilannoituksella on

inhiboiva vaikutus metaania hapettavien metanotrofisten bakteerien toimintaan metsämailla, minkä tukee tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia. Kuitenkin perustelua heikentää se, että kontrollikäsittelyn sekä kuitusavi 15 ja 3 käsittelyillä ei ollut tilastollisesti merkittävää eroa lannoittamattomaan. Myös osassa käsittelyistä hajonnat olivat niin suuret, että tulosten merkitsevyys laskee. Hütschin ym. (1994) tutkimuksessa pH:n aleneminen laski metaanin kulutusta. Tässä tutkimuksessa pH:n vaikutus metaanin kulutukseen on ristiriitaista. On selvää, että kuitusavi 15 ja 3 -käsittelyillä, joilla oli kalkitusvaikutusta, metaanin kulutus oli korkeampi kuin kipsisakka 3:lla (pH 4,81). Kuitenkin kuitusavi 15 + kipsisakka 3:n metaanin kulutus oli kontrollia matalampi, vaikka sen pH oli huomattavasti korkeampi kuin kontrollin. Tässä on kuitenkin otettava huomioon jälleen näytteiden suuret hajonnat. Lannoittamattomasta ei määritetty pH:ta, mutta sen pH oli luultavasti samaa luokkaa kuin kontrollin. Edellä mainitun lannoittamattomuuden vaikutus näytti vaikuttavan metaanin korkeaan kulutukseen lannoittamattomassa käsittelyssä pH:ta enemmän.

7.3 Maanparannusaineiden vaikutukset maan lämpötalouteen

Työn hypoteesina oli, että maanparannusaineilla voidaan parantaa maan lämpötalousominaisuuksia. Maan lämmönjohtavuus ja lämmön diffusiviteetti pysyivät turvemaille tyypillisellä tasolla (van Duin 1963) maanparannuskäsittelyistä riippumatta. Koska koekäsittelyt eivät muuttaneet maan vedenpidätysominaisuuksia merkitsevästi (jäljempänä), lämpökapasiteetissakaan ei tämän takia esiintynyt eroavaisuuksia käsittelyjen välillä. Hypoteesin vastaisesti maanparannusainekäsittelyt eivät vaikuttaneet oleellisesti turvemaan lämpötalousominaisuuksiin, vaikka maanparannusaineiden levitysmäärät olivat suuria. Kuitusaven lämmönjohtavuus ($0,6 - 0,7 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$, Hyvönen 2014) oli samaa luokkaa kuin turpeen (Taulukko 1, Hanson ym. 2000). Tämän saattaa olla yksi syy, miksi kuitusavella ei ollut vaikutusta maan lämpötalousominaisuuksiin. Kuitenkin kuitusaven tiivistymisalttiuden takia, sen oletettiin lisäävän maan murujen kosketusta toisiinsa, ja siten parantaen lämpöominaisuuksia maassa. Maanparannusaineet eivät vaikuttaneet maan irtotiheyteen tai maan vesipitoisuuteen (jäljempänä), mikä tukee lämpötalouteen vaikuttavia tuloksia. Koejärjestelyllä on saattanut olla vaikutusta maan lämmönjohtavuuteen ja -diffusiviteettiin. Rakennenäytteet otettiin perunapenkkiä päältä, jossa perunan istutuksen ja perunan kasvun vaikutuksesta maa oli löyhää. Löyhässä maassa maan lämmönjohtavuus ja -diffusiviteetti ovat pienemmät kuin tiiviimmässä maassa. Toisaalta maa ei ollut niin löyhää, etteikö rakennenäytteiden ottaminen metallilieriöihin olisi onnistunut.

Kipsin tai kuitusaven vaikutuksia lämmönjohtavuuteen tai lämmön diffusiviteettiin ei ole tutkittu turvemaidella eikä kivennäismailla. Sen sijaan biohiilen käyttö laskee maan lämmönjohtavuutta kivennäismaalla (sandy loam, suom. karkea hieta), johtuen maan irtotiheyden laskusta (Zhang ym. 2013). Pessin (1959a) tutkimuksessa mukaan kalkitus (CaO) kasvattaa maan lämpötilaa rahkaturvesuolla. Tämä johtuu kalkituksen aiheuttamasta pH:n noususta, mikä lisää maan mikrobitoimintaa, mikä puolestaan tuottaa lämpöä. Pessin (1959a) tutkimuksessa kalkitusmäärän kasvaessa lämpötilaerot tulivat suuremmiksi kalkitun ja kalkitsemattoman välillä. Tämän mukaan kuitusaven suuren kalkitusvaikutuksen voi odottaa vaikuttavan maan lämpötilaa nostavasti. Kuitenkaan tässä tutkimuksessa kuitusaven käytöllä ei saatu eroja veden kyllästämisen tai kenttäkapasiteettikostean maan lämpötilaan tai maan lämpöominaisuuksiin verrattuna muihin käsittelyihin, kun mittaukset tehtiin laboratoriossa. Kentällä ja laboratoriossa mitattuja lämpöominaisuusmittausten tuloksia on vaikea verrata toisiinsa, sillä maan kosteuspitoisuus vaihtelee kenttäolosuhteissa, vaikuttaen maan lämpötilaan.

Turvemaiden viljelyominaisuuksia on aikaisemmin yritetty parantaa kivennäismaalisäyksillä (Kemppainen 1992, s.295). Pessin (1959b) mukaan turvemaan maanparannus saveamalla nostaa turvemaan lämpötilaa kesäkuukausina jopa asteen verran enemmän kuin saveamattoman, ja vaikutus kestää useita vuosikymmeniä. Saveaminen ja kivennäismaan käyttö maanparannusaineena turvemaille perustuu turvemaiden rakenteen tiivistymiseen (Kemppainen 1992, s.298). Saveamalla maa saattaa painua yli 10 cm verrattuna saveamattomaan (Pessi 1959b). Kuitusavea on aikaisemmin käytetty kaato- ja liikuntapaikkojen tiivistysmateriaalina (Metsä Tissue 2020). Kuitusaven herkin tiivistymisalttiuden (Finncas Oy 2001) takia, sen käytöllä voitaisiin periaatteessa parantaa turvemaiden lämpöoloja, ja ehkäistä kylmyydestä aiheutuvia satovahinkoja. Lisättävien kuitusavimäärien ja niillä aikaansaattavien turvemaan rakenteenmuutosten pitää epäilemättä olla huomattavasti suurempia kuin tässä tutkimuksessa, jossa näitä vaikutuksia ei havaittu.

7.4 Maanparannusaineiden vaikutus maan vesitalousominaisuuksiin

Turvemaalla maanparannusaineiden lisäys ei vaikuttanut maan hydrauliseen vedenjohtavuuteen taikka maanvedenpidätysominaisuuksiin verrattuna kontrolliin tai lannoittamattomaan kontrolliin. Syynä voi olla, että lisäykset eivät olleet tarpeeksi suuria, jotta ne olisivat vaikuttaneet turvemaan jo

ennestään korkeaan hydrauliseen vedenjohtavuuteen tai vedenpidättymiskykyyn. Tämän tutkimuksen kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus oli kaikilla koejäsenillä noin 26-kertainen verrattuna Ronkasen ja Kløven (2005) saraturvemaalta mitattuihin tuloksiin. Kämäräinen ym. (2018) tutki vedellä kyllästettyjen vaalean (maatumisaste von Postin mukaan H2) ja tumman (maatumisaste von Postin mukaan H5) turpeen hydraulisia vedenjohtavuuksia. Saamiensa tulosten mukaan vaalean turpeen hydraulinen vedenjohtavuus oli 350 cm h^{-1} (8400 cm d^{-1}) ja tumman 87 cm h^{-1} (2080 cm d^{-1}). Tämän tutkimuksen kyllästyneen maan hydrauliset vedenjohtavuudet sijoittuvat Kämäräisen ym. (2018) saamien tulosten väliin, ollen lähempänä tumman turpeen vedenjohtavuutta.

Perunan viljelyyn liittyvä voimakas maan muokkaus saattoi olla yksi suurimmista syistä tämän tutkimuksen korkeaan hydrauliseen vedenjohtavuuteen. Rakennenäytteet otettiin penkkien päältä, missä maan rakenne oli aistinvaraisesti havaittuna löyhää. Jos maanparannusaineiden vaikutusta maan ominaisuuksiin, kuten hydrauliseen vedenjohtavuuteen, olisi tutkittu myös penkkien väleistä otetuista rakennenäytteistä, maanparannusaineiden vaikutusta maan rakenteen ominaisuuksiin olisi voitu tarkastella laajemmin. Maanparannusaineet oli kuitenkin sekoitettu pintamaahan, josta penkit oli muotoiltu. Näin ollen näytteenoton aikaan suurin osa maanparannusaineista oli epäilemättä penkeissä ja niiden vaikutus penkkien väleissä oli ilmeisesti vähäinen.

Myös turpeen maatuneisuus (maatumisaste) vaikuttaa hydrauliseen vedenjohtavuuteen. Turpeen maatuessa se tiivistyy ja sen irtotiheys kasvaa, minkä seurauksena sen hydraulinen vedenjohtavuus laskee. Tässä tutkimuksessa maanparannusainekäsittelyt eivät vaikuttaneet maan kuivaan irtotiheyteen. Lisäksi vuosia ennen kokeen perustamista vähiten maatuneet turvekerrokset oli turpeen noston yhteydessä kuorittu pois, ja ennen kokeen perustamista koeala kynnettiin, jolloin turvekerrokset olivat sekoittuneet keskenään. Se, kuinka pitkälle hajonnutta von Postin asteikon mukaan tämän tutkimuksen turvema oli, ei ole tiedossa. Kuitusavea on aikaisemmin käytetty kaato- ja liikuntapaikkojen tiivistysmateriaalina (Metsä Tissue 2020). Se siis tiivistyy helposti. Tämä näkyy myös tuloksissa siten, että kuitusavi 15 käsittelyllä hydraulinen vedenjohtavuus oli kaikkein matalin, vaikka tilastollisesti merkittävää eroa muihin käsittelyihin ei ollut. Kuitenkaan muissa kuitusavea sisältävissä käsittelyssä tämä ei näkynyt. Tässä tutkimuksessa kipsisakan vaikutukset maan vesitalouteen jäivät vähäisiksi, kun taas OSMO-hankkeessa kipsin käyttö ($5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) savimailla paransi maan vedenjohtavuutta (Mattila ym. 2018).

Kivennäismailla primäärikuitujen ja siistauslietteiden on eri tutkimuksissa havaittu kasvattavan tai laskevan maan vedenpidätyskykyä ja hydraulista vedenjohtavuutta (Ritter ym. 1992; Aitken ym. 1998; Simard ym. 1998; Nemati ym. 2000a; Nemati 2000b; Chow 2002). Maan vesipitoisuus oli 45 Mg ha^{-1} siistauslietelisyksellä noin 10 % suurempi kuin käsittelemättömällä kontrollilla (Simard ym. 1998), kun taas 300 Mg ha^{-1} levitettynä maan vesipitoisuus kasvoi 17 % käsittelemättömään verrattuna (Aitken ym. 1998). Primäärikuidun lisäys kasvatti maan vesipitoisuutta 7,7- ja 15,3 prosenttiyksikköä 20- ja 160 Mg ha^{-1} levitysmäärillä kontrolliin verrattuna pF pisteessä 2,5 (Chow ym. 2002). Kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus kasvoi 16,4 % verrattuna kontrolliin, kun maahan lisättiin primäärikuitua 160 Mg ha^{-1} (Chow ym. 2002). Sen sijaan maalajiltaan samankaltaiseen maahan (sandy loam, suom. karkea hieta) levitetty 24 Mg ha^{-1} siistausliete laski maan hydraulista vedenjohtavuutta 35 % verrattuna käsittelemättömään kontrolliin. Samalla levitysmäärällä, mutta hienojakoisemmassa maassa (loamy) kyllästyneen maan hydraulinen vedenjohtavuus kasvoi, mutta ei tilastollisesti merkittävästi (Nemati ym. 2000a). Chowin ym. (2002) ja Nematin ym. (2000a) erilaisiin maan hydraulisiin vedenjohtavuuksiin voi olla syynä primäärikuidun ja siistauslietteen hieman vaihtelevat ominaisuudet sekä levitysmäärät. Nematin ym. (2000a) mukaan maanparannusaineiden sisältämät kestävätkä kuidut ja kaoliini voivat tukkia maan huokoisia ja estää veden kulkeutumisen, eikä sen käyttöä karkeilla kivennäismailla suositella.

Puuteollisuudesta peräisin olevien kuituja sisältävien maanparannusaineiden vaikutuksen kestossa maan vesitalousominaisuuksiin on vaihtelevuutta. Simard ym. (1998) havaitsivat maan vesipitoisuuden kasvaneen vain ensimmäisenä vuonna, kun siistauslietettä lisättiin, minkä jälkeisinä vuosina vesipitoisuus oli palautunut samalle tasolle kuin ennen levitystä. Sen sijaan Chowin ym. (2002) tutkimuksessa primäärikuidun vaikutukset maan vedenpidätyskapasiteettiin oli huomattavat vielä vuoden jälkeen levityksestä. Erot johtuvat luultavimmin siitä, että primäärikuitujen ja siistauslietekuittujen ominaisuudet ovat hiukan erilaiset sekä maaperän ja ilmaston erilaisista olosuhteista.

Vedenjohtavuusmittauksissa esiintyi hyvin paljon hajontaa. Tämä johtuu muun muassa näytteiden heterogeenisyydestä. Lisäksi mittauslaitteistosta on saattanut aiheutua virhettä tuloksiin. Mittauslaitteiston sifonit täytettiin kylmällä vesijohtovedellä, jonka lämmitessä sifoneihin on saattanut muodostua ilmakuplia, mikä heikentää veden virtausta. Saraston (1961) mukaan turvenäytteiden vedenjohtavuus tasaantuu vasta 1-4 vuorokauden valutuksen jälkeen,

vedenjohtavuuden pienetessä ennen tasaantumista. Epäselvää on se, että käyttikö Sarasto (1961) tutkimuksessaan näytteiden esikyllästystä, mikä selittäisi turvenäytteiden hitaan kyllästymisen. Tässä tutkimuksessa näytteet eivät olleet vedenjohtavuusmittauslaitteistossa tasaantumassa kuin korkeintaan puoli vuorokautta. Samasta näytteestä ei tehty peräkkäisiä mittauksia. Riittämätön tasaantumisaika on olla voinut osasyynä kyllästyneen maan hydraulisen vedenjohtavuustulosten suureen hajontaan. Tämän merkitys ei kuitenkaan ollut kovin suuri, koska näytteet olivat kyllästymässä vedessä muovisessa laatikossa pitkään ennen mittausta. Eräitä muita syitä näytteiden heterogeenisuuteen on tarkasteltu luvussa 7.6.

7.5 Maanparannusaineiden vaikutukset maan happamuuteen

Kuitusavella on selvä kalkitusvaikutus, sillä kaikilla kuitusavea sisältävillä käsittelyillä maan pH kasvoi merkittävästi. Kaikkein suurin vaikutus saatiin 15 kuitusavilisäyksellä. Myös Kukkonen ym. (2011) ja Simard ym. (1998) saivat samankaltaisia tuloksia. Sen sijaan neutraaleilla tai hiukan emäksisillä mailla siistauslietteen lisäys ei vaikuttanut tilastollisesti merkittävästi maan happamuuteen (Aitken ym. 1998). Kalkitusaineena käytettyyn kalsiumkarbonaattiin (CaCO_3) verrattuna, kuitusaven kalkitusvaikutus oli samaa luokkaa, happamalla trooppisella savimaalla (clay) tehdyssä astiakokeessa (Voundi Nkana ym. 1998). Kuitusaven kalkitusvaikutuksen ansiosta sitä voitaisiin käyttää kalkin sijasta. Westin ja Marlandin (2002) mukaan kalkin (CaCO_3) valmistuksessa muodostuu 35,73 kg hiiltä per kalkkikivitonni. Tämä tarkoittaa, että hiilidioksidia muodostuu 66,67 m³ per kalkkikivitonni. Silti teollisuuden sivutuotteena syntynyt kuitusavi on hyvä vaihtoehto kalkille, sillä sen käyttö muun muassa edistää kiertotaloutta. Kuitenkin kuitusaven käyttöä kalkitusaineena turvemailla tulee tarkkailla, ja jopa rajoittaa, sillä liian korkeaksi nostettu pH vähentää monien mikroravinteiden saatavuutta kasveille (Viljavuuspalvelu 2008). Lisäksi turvemailla pH:n nousu kiihdyttää orgaanisen aineksen mineralisaatiota, ja siten kasvattaa kasvihuonekaasupäästöjä.

Kipsisakan käyttö vaikutti laskevan maan pH:ta vesiuuttoisessa pH:n määrittämisessä, mutta tilastollisesti merkittävää eroa kontrolliin ei ollut. Muissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu kipsin happamoittava vaikutus (Chung ym. 2001; Hao ym. 2005; Lee ym. 2009). Kipsin happamoittava vaikutus perustuu sen maan suolapitoisuuden nousuun (John Nurmisen säätiö 2019), mikä näkyy

vesiuuttoisessa pH-mittauksessa. Sen sijaan Chungin ym. (2001) fosforihappoteollisuuden sivutuotteena syntyvä fosfokipsi (engl. phosphogypsum) sisältää vapaita happoja, ja siksi sen toistuva käyttö saattaa happamoittaa maata. Happamuudesta kärsivillä alueilla, maan pH tulisi nostaa riittävän korkeaksi ennen kipsin käyttöä maanparannusaineena (Ollikainen ym. 2018). Kipsisakka sisältää sulfaattia, joten sen käyttöä maanparannusaineena järvien valuma-alueilla on syytä rajoittaa, sillä järvien sulfaattipitoisuus on matala. Tällöin kipsisakan sulfaatti saattaa lisätä järvien sisäitä kuormitusta ja vapauttaa pohjasedimentistä liukoista fosforia.

7.6 Tuloksiin vaikuttaneita tekijöitä

7.6.1 Poikkeavien havaintojen tarkastelu ja poisto

Maamurujen vedenkestävyyismäärytyksissä useassa näytteessä vedenkestävien murujen laskennallinen osuus ylitti 100 %. Virhe on luultavimmin tapahtunut kuiva-aineanalyysissä. Kenttäkostean maan kuiva-aineanalyysi tehtiin suoraan kentältä tultaessa, jolloin maa saattoi olla hieman kosteampaa kuin maa, joka otettiin viikkoja myöhemmin samasta pussista muruanalyysiin. Kenttäkostean maan kuiva-aineanalyysiin otettu maa ei myöskään ollut seulottu, minkä takia analyysiin päätyi kooltaan, ja sen takia myös kosteudeltaan vaihtelevampaa maata kuin muruanalyysiin, johon otettiin halkaisijaltaan 2-10 mm kokoisia muruja. Muruanalyysiin otettu maa seulottiin laakealle tarjottimelle, josta maata punnittiin muruanalyysiin. Seulonnan ja punnituksen aikana kenttäkostea maa oli saattanut kuivahtaa, minkä takia vedenkestävien murujen osuus nousi joillakin näytteillä yli 100%. Seulonnan aikana suurimpia maanparannusainepaakkuja hajotettiin pienemmiksi paloiksi käsin. Tällöin palojen ominaispinta-ala kasvoi, jolloin ne saattoivat kuivahtaa nopeammin. Esikostutetulla maalla kuiva-aineanalyysi tehtiin muruanalyysin jälkeen. Koska kuiva-aineanalyysiin mennyt maa-erä oli ehtinyt kostua kauemmin kuin muruanalyysiin käytetty maa, kuiva-aineanalyysiin mahdollisesti päätyi hieman kosteampaa maata kuin itse muruanalyysiin. Kuiva-aineanalyysin rinnakkaisnäytteiden suhteelliset poikkeamat vaihtelivat muutamasta prosentista jopa yli 10 %, minkä perusteella voi todeta, että yksittäisen maanäytteen kuiva-ainepitoisuutta ei tunneta tätä tarkemmin. Todellisuudessa vaihtelu on voinut olla vielä suurempi, sillä murunäytteiden kuivamassat olivat pienempiä kuin kuiva-ainenäytteet. Näiden pohdintojen perusteella veden kestävien murujen osuuksien laskentaan päätettiin ottaa mukaan kuiva-aineanalyysin

rinnakkaisnäytteistä suurin tulos. Korjauksen jälkeen tulokset, joissa kestävien murujen osuus vielä ylitti 100 % hylättiin (Taulukko 7).

Taulukko 7. Vedenkestävien murujen määrittämisessä hylättyjen rinnakkaisnäytteiden määrä.

Käsittely	Esikostutettu			Kenttäkosteus	
	Seula	Kerranne	Rinnakkaiset, kpl	Kerranne	Rinnakkaiset, kpl
Kipsisakka 3	2 mm	III	1		
Kuitusavi 15	0,25 mm			I	1
	2 mm	III	1		
Kuitusavi 15 + kipsisakka 3	0,25 mm	I	1	I	2
	2 mm			I	1

Toinen virhe vedenkestävien murujen kuiva-ainemäärittämisessä oli, että kontrollikäsitellyn esikostutetun maan kuiva-ainetta jäi epähuomiossa määrittämättä. Kuiva-ainepitoisuus kuitenkin määritettiin jälkikäteen matemaattisesti estimoimalla, käyttäen kontrollikäsitellyn kenttäkosteaman kuiva-ainepitoisuutta ja kipsisakka 3 -käsitellyn esikostutetun ja kenttäkosteaman kuiva-ainepitoisuuksien välistä regressiota. Estimointi perustuu oletukseen, että maanparannusaineista todennäköisesti lähimpänä kontrollikäsitellyn kuiva-ainepitoisuutta on kipsisakka 3 kg m⁻², kipsisakka vaikutti esikostutettujen murujen kosteuteen vähän, ja vähemmän kuin kuitusavilisäykset.

7.6.2 Maanparannusaineiden levitykseen liittyvät virhetekijät

Kenttäkoe päästiin aloittamaan rahoituksellisista syistä verrattain myöhään. Maanparannusaineiden levitys sekä perunan istutus tehtiin vasta heinäkuun alussa, kun normaaleissa tilanteissa tämä olisi tapahtunut jo huhti-toukokuussa. Tästä syystä maanparannusaineet ehtivät vaikuttaa maassa vain noin neljä kuukautta. Nemati ym. (2000a) saivat kivennäismailla (silty clay ja loamy) vedenkestävien murujen määrittämisessä tilastollisesti merkittäviä tuloksia vasta 7 ja 12 kuukauden jälkeen siistauslietteen levityksestä (Nemati ym. 2000a). Maanparannusaineiden levittäminen koealueelle ei ollut tapahtunut tasaisesti (Kuva 14). Penkkien päällä ja väleissä oli silmämääräisesti eri määrä maanparannusainetta. Lyhyen vaikutusajan ja maanparannusaineen epätasaisen levityksen

vuoksi koealalla oli silmämääräisesti havaittuna hyvin vähän maan ja maanparannusaineen yhteenliittymiä eli muruja, joissa oli sekä maata että maanparannusainetta.

Kuitusavea esiintyi maassa osittain isoina, nyrkkiäkin suurempina kokkareina (Kuva 14). Isoina kokkareina kuitusaven vaikutus maaperään oli heikompi kuin kooltaan pienimpinä palasina. Murujen vedenkestävyyden esivalmisteluvaiheessa, jossa maasta erotettiin käsin mekaanisesti seulomalla halkaisijaltaan 2-10 mm kokoiset murut, isoja kokkareita piti murskata käsin pienimmiksi palasiksi. Näin analyysiin saatiin tasaisesti sekä maata että maanparannusainetta. Ilman murskausta maan ja kuitusaven suhde olisi ollut virheellinen. Kuitenkin murskauksella muutettiin murujen kokoa ja heikennettiin jo olemassa olevien murujen rakennetta.



Kuva 14. Kuitusavikokkare kentällä. Taustalla näkyy penkkien päällä ja niiden välillä olevan kuitusaven epätasaisen jakautumisen.

7.6.3 Lierojen vaikutus rakennenäytteistä tehtyihin mittauksiin

Rakennenäytteissä suuria ongelmia aiheuttavia ja tuloksiin vaikuttavia tekijöitä olivat rakennenäytteissä esiintyvät lierot (Kuva 14). Lieroja oli rakennenäytteissä useita, ellei jopa kymmeniä, joista osa saatiin noukittua pinseteillä pois. Näytteisiin jäi kuitenkin tiedettävästi lieroja, niiden pyydystämisestä huolimatta. Lierot muokkasivat maata jo kyllästymisvaiheessa. Lierojen toiminnan seurauksena rakennenäytteiden massat lopussa eivät olleet samoja kuin määritysten alussa, sillä lierot nostivat toiminnallaan maata pois näytteestä (Kuva 14). Lierot vaikuttivat vedenjohtavuutta nostamalla, sillä lierojen toiminta loi näytteisiin oikovirtausreittejä. Kaasumäärittelyn inkubaatiovaiheessa lierojen hengittäessä ne tuottivat hiilidioksidia, jolloin hiilidioksidipitoisuudet ovat todellisuutta korkeammat. Lämmönjohtavuuteen lierojen toiminta on vaikuttanut lämmönjohtavuutta ja lämmön diffusiviteettia alentavasti, sillä lierokäytävien vuoksi näytteisiin oli muodostunut huokosia, joissa lämmönjohtavuus on huonompi.



Kuva 14. Lierot muokanneet rakennenäyteitä ja nostaneet maata pois lieriöstä hiekkapedillä.

8 Johtopäätökset

Tämän maisteritutkielman tarkoituksena oli tarkastella teollisuuden sivutuotteena saatavien maanparannusaineina käytettävien kuitusaven ja kipsisakan vaikutuksia maan rakenteen kestävyteen, kasvihuonekaasujen (CO_2 ja N_2O) tuotantoon sekä maan lämpö- ja kaasutalouteen turvemailla. Maanparannusaineiden käytöstä turvemailla on tehty hyvin vähän tutkimusta, joten tämän tutkimuksen avulla saatiin lisätietoa kipsisakan ja kuitusaven maanparannusvaikutuksista viljellyillä turvemailla.

Viljeltyjen turvemaiden keskeisimpiä ongelmia ovat niiden heikko kantavuus, kasvihuonekaasupäästöt, kylmyys ja happamuus. Tulosten perusteella käytetyillä maanparannusaineilla ei ollut suurta vaikutusta turvemailla esiintyviin viljelyongelmiin. Tulosten perusteella maanparannusaineilla ei ollut vaikutusta maan rakenteen kestävyteen, maan lämpöominaisuuksiin tai vesitalousominaisuuksiin. Näin ollen maanparannusaineilla ei voida vähentää maan liettymisherkkyttä tai parantaa maan kantavuutta, eikä vähentää hallan esiintyvyyttä ja nopeuttaa roudan sulamista tai maan lämpenemistä. Tulosten perusteella kuitusaven käytöllä ei pystytä vähentämään viljellyiltä turvemailla syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä, vaan sen käytöllä hiilidioksidin tuotto jopa kasvaa. Kuitusavella havaittiin suuri kalkitusvaikutus. Suurella levitysmäärällä (15kg m^{-1}) maan olosuhteet muuttuivat heikosti alkaliseksi, minkä perusteella sen käyttöä on hyvä tarkkailla. Kasvihuonekaasujen syntymiseen voidaan kipsisakan osalta vaikuttaa vain hiilidioksidiin, sillä se kasvattaa maan ionipitoisuutta eikä vaikuta turvemaiden matalaan pH:hon. Jatkotutkimuksena olisi hyvä selvittää kipsisakan vaikutuksia kasvihuonekaasupäästöihin kalkituksen läpikäyneillä turvepelloilla.

Kuitusaven laatu ja ominaisuudet vaihtelevat tehdaskohdittain. On mahdollista, että tässä tutkimuksessa käytetyn kuitusaven ominaisuudet poikkeavat muilta tehtailta tulleesta kuitusavesta. Tästä syystä, sekä vähäisen turvemailla olemassa olevan tutkimustiedon vuoksi, kuitusaven ja kipsisakan käytöstä turvemaiden maanparannusaineena tulisi tehdä enemmän tutkimusta. Kuitusavella ja kipsisakalla on suuri potentiaali kiertotalouden edistäjänä.

9 Kiitokset

Haluan kiittää Asko Simojokea ohjauksesta ja palkkaamisesta mielenkiintoiseen projektiin, Miia Collanderia, Minna Mäkelää ja Marjut Wallneria, jotka auttoivat laboratoriomittauksissa, Sami Mustosta hissin 3D-tulostuksesta. Kiitos myös ystäväilleni ja perheelleni kaikista tsempeistä. Kiitos Unicafe Ruskeasuon maittavasta ruuasta. Suurimmat kiitokset haluan esittää Juusolle tuesta ja avusta projektin varrella. Ilman sinua en olisi päässyt tavoitteeseeni!

10 Lähteet

- Abu-Hamdeh, N. H. ja Reeder, R. C. 2000. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1285–1290.
- Aciego Pietri, J. C. & Brookes, P. C. 2008. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 40: 1856–1861.
- Aitken, M. N., Evans, B. & Lewis, J. G. 1998. Effect of applying paper mill sludge to arable land on soil fertility and crop yields. *Soil Use and Management*, 14: 215–222.
- Alakukku, L. 2016. Maan rakenne. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltonen, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojajyhdistys. s. 53–72.
- Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil & Tillage Research*, 37: 223–238.
- Baggs, E. M., Rees, R. M., Castle, K., Scott, A., Smith, K.A. & Vinten, A. J. A. 2002. Nitrous oxide release from soils receiving N-rich crop residues and paper mill sludge in eastern Scotland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 90: 109–123.
- Bajpai, P. 2015. Pulp and Paper Chemicals. Teoksessa: Pulp and Paper Industry: Chemicals. s. 25–273.
- Ball, B. C. 2013. Soil structure and greenhouse gas emissions: a synthesis of 20 years of experimentation. *European Journal of Soil Science*, 64: 357–373. Bateman, E. J. & Baggs, E.

- M. 2005. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space. *Biology and Fertility of Soils*, 41: 379–388.
- Bipfubusa, M., N'Dayegamiye, A. & Antoun, H. 2005. Effets de boues mixtes de papetières fraîches etcompostées sur l'agrégation du sol, l'inclusion et laminéralisation du C dans les macro-agrégats stablesà l'eau. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 47–55.
- Bipfubusa, M., Angers, D. A., N'Dayegamiye, A. & Antoun, H. 2008. Soil Aggregation and biochemical properties following the application of fresh and composted organic amendments. *Soil Science Society of America Journal*, 72: 160–166.
- Boelter, D. H. 1969. Physical properties of peats as related to degree of decomposition. *Soil Science Society of America*, 33: 606–609.
- Bronick, C. J & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3–22.
- Brtnický, M., Elbl, J., Dvořáková, H., Kynický, J. & Hladký, J. 2017. Changes in soil aggregate stability induced by mineral nitrogen fertilizer application. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65: 1477–1482.
- Bulluck III, L. R., Brosius, M., Evanylo, G. K. & Ristaino, J. B. 2002. Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Applied Soil Ecology*, 19: 147–160.
- Camberato, J. J., Gagnon, B., Angers, D. A., Chantigny, C. H. & Pan, W- L. 2006. Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources. *Canadian Journal of Soil Science*, 86: 641–653.
- Caron, J., Espindola, C. R. & Angers, D.A. 1996. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties. *Soil Science Society of America Journal*, 60: 901–908.
- Caron, J. & Rivière, L.-M. 2003. Quality of peat substrates for plants grown in containers. *Teoksessa: Parent, L-E. & Ilnicki, P. Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. CRC Press. s. 67–91.*
- Chantigny, M. H., Angers, D. A. & Beauchamp, C. J. 2000. Active carbon pools and enzyme activities in soils amended with de-inking paper sludge. *Canadian Journal of Soil Science*, 80: 99–105.

- Chantigny, M. H., Pelster, D. E., Perron, M.-H., Rochette, P., Angers, D. A., Parent, L.-E., Massé, D. & Ziad, N. 2013. Nitrous oxide emissions from clayey soils amended with paper sludges and biosolids of separated pig slurry. *Journal Environmental Quality*, 42: 30–39.
- Charpentier, J., Farias, L., Yoshida, N., Boontanon, N. & Raimbault, P. 2007. Nitrous oxide distribution and its origin in the central and eastern South Pacific Subtropical Gyre. *Biogeosciences Discussions*, 4: 1673–1702.
- Chen, Q., Wang, S., Li, Y., Zhang, N., Zhao, B., Zhuo, Y. & Chen, C. 2015. Influence of flue gas desulfurization gypsum amendments on heavy metal distribution in reclaimed sodic soils. *Environmental Engineering Science*, 32: 470–478.
- Chow, T. L., Rees, H. W., Fahmy, S. H. & Monteith, J. O. 2002. Effects of pulp fibre on soil physical properties and soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of Soil Science*, 83: 109–119.
- Chung, J-B., Kang, S-C. & Park, S. 2001. Short-term effect of phosphogypsum on soil chemical properties. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 20: 317–324.
- Cox, W., Varcoe, J., Chittleborough, D. J. & van Leeuwen, J. 2005. Using gypsum to reduce phosphorus in runoff from subcatchments in south Australia. *Journal of Environmental Quality*, 34: 2118–2128.
- Dawson, Q., Kechavarzi, C., Leeds-Harrison, P. B. & Burton, R. G. O. 2010. Subsidence and degradation of agricultural peatlands in the Fenlands of Norfolk, UK. *Geoderma*, 154: 181–187.
- Denef, K., Six, J., Bossuyt, H., Frey, S. D., Elliott, E. T., Merckx, R. & Paustian, K. 2001. Influence of dry–wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biology and Biochemistry*, 33: 1599–1611.
- Ekholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiirikki, M., Lahti, K. & Pietola, L. 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. *Agricultural and Food Science*, 21: 279–291.
- Ekholm, P. & Järvenranta, K. 2020. Talvilevityskokeiden tulos: Ei kipsiä routaiseen maahan. SAVE – Saaristomeren vedenlaadun parantaminen peltojen kipsikäsittelyllä. Internetlähde: <https://blogs.helsinki.fi/save-kipsihanke/2020/06/16/talvilevityskokeiden-tulos-ei-kipsia-routaiseen-maahan/>. Viitattu 1.10.2020.

- Faubert, P., Bélisle, C. L., Bertrand, B., Bouchard, S., Chantigny, M. H., Paré, M. C., Rochette, P., Ziadi, N. & Villeneuve, C. 2019. Land application of pulp and paper mill sludge may reduce greenhouse gas emissions compared to landfilling. *Resources, Conservation & Recycling*, 150. 13 s.
- Finncao Oy. 2001. Finncao-kuitusavet pintarakenteiden tiivistekerroksissa — Suunnittelu- ja mitoitusohje. Saatavissa: <https://www.metsatissue.com/en/AboutUs/Operations-in-Finland/Suomi/tuotannon-sivutuotteet/Documents/Suunnittelu-%20ja%20mitoitusohje%20pintarakenteiden%20tiiviskerrokset.pdf>
- Grandy, A. S., Porter, G. A. & Erich, M. S. 2002. organic amendment and rotation crop effects on the recovery of soil organic matter and aggregation in potato cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1311–1319.
- Grønlund, A., Hauge, A., Hovde, A. & Rasse, D. P. 2008. Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway: a comparison of three methods. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 81: 157–167.
- Hadzic, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Korppoo, M., Laamanen, T., Korhonen, A., Räisänen, J., Huttunen, M., Vento, T. & Ihme, R. 2020. Toimintamallit happamuuden ennakoinniseksi ja riskien hallitsemiseksi turvetuotannossa. Sulfa II -hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16. 115 s.
- Hamza, M. A. & Anderson, W. K. 2003. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54: 273–282.
- Hanke, D. & Dick, D. P. 2017. Aggregate Stability in soil with humic and histic horizons in a toposequence under araucaria forest. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, 41. 18 s.
- Hanson, J. L., Edil, T. B. & Yesille, N. 2000. Thermal properties of high water content materials.
- Hao, X., Larney, F. J., Chang, C., Travis, G. R., Nichol, C. K. & Bremer, E. 2005. The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting. *Journal of Environmental Quality*, 34: 774–781.
- Heikurainen, L. & Seppälä, K. 1963. Kuivatuksen tehokkuus ja turpeen lämpötalous. *Acta Frestalia Fennica*, 76. 33 s.

- Heinonen, R. 1992. Maan rakenne. Teoksessa: Heinonen, R. (toim.), Hartikainen, H., Aura, E., Jaakkola, A. & Kempainen, E. Maa, viljely ja ympäristö. Porvoo: WSOY. s. 91–141.
- Heiskanen, J. 2017. Loppuraportti: Kipsilevyjätteen vaikutus kuusen ja männyn taimien kasvuun kasvihuonekokeessa. Suonenjoki: Luonnonvarakeskus. 10 s.
- Hillel, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Science & Technology. 494 s.
- Hotanen, J.-P. Suomalaiset ovat olleet maailmanmestarikansaa muun muassa ralli- ja formula-autoilussa, kahvinjuonnissa, pylväännokassa ja muurahaispesässä istumisessa – sekä soiden ojittamisessa. Internetlähde: <https://www.luke.fi/blogi/suomen-turvemaiden-tila/>. Viitattu 12.10.2020.
- Huhtinen, M., Kettunen, A., Nurminen, P. & Pakkanen, H. 2000. Höyrykattilatekniikka. 5. painos. Edita, Helsinki: Opetushallitus. 379 s.
- Hütsch, B. W., Webster, C. P. & Powlson, D. S. 1994. Methane oxidation in soil as affected by land use, soil pH and N fertilization. Soil Biology and Biochemistry, 26: 1613–1622.
- Hytönen, J. & Silfverberg, K. 1991. Kuivatustehon vaikutus turvemaan lämpöoloihin. Folia Forestalia 780. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos. 25 s.
- Hyvönen, I. 2014. Kuitutuhkan pitkäaikaistoimivuus teiden ja urheilukenttien päällysrakenteissa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma. 73 s.
- Iivonen, S. 2008. Ympäristöturpeet ja niiden käyttö. Raportteja 32. Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. 60 s.
- Ilnicki, P. 2003. Agriculture production systems for organic soil conservation. Teoksessa: Parent, L-E. & Ilnicki, P. Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. CRC Press. s. 187–199.
- Ilnicki, P. & Zeitz, J. 2003. Irreversible loss of organic soil functions after reclamation. Teoksessa: Parent, L-E. & Ilnicki, P. Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. CRC Press. s. 15–32.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Pachauri, R. K. & Meyer, L. (toim.). Geneve, Sveitsi: IPCC. 151 s.
- Ivarson, K. C. 1977. Changes in decomposition rate, microbial population and carbohydrate content of an acid peat bog after liming and reclamation. Canadian Journal of Soil Science, 57: 129–137

- Jacobsen, R. T., Lemmon, E. W., Penoncello, S. G., Shan, Z. & Wright, N. T. 2003. Thermophysical properties of fluids and materials. Teoksessa: Bejan, A. & Kraus A. D. Heat transfer handbook. New York: John Wiley & Sons.
- John Nurmisen säätiö. 2009. Kipsihankkeiden kuulumisia. Internetlähde: https://johnnurmisenfaatio.fi/wp-content/uploads/2019/06/kipsihankkeiden-kuulumisia_09_2019.pdf. Viitattu 9.10.2020.
- Kasimir-Klemedtsson, Å., Klemedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J. & Oenema, O. 1997. Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review. *Soil Use and Management*, 13: 245–250.
- Kauppinen, M. 2015. Metallien liukoisuus mustaliuskepitoisen turpeenottoalueen maassa. Maaperä- ja ympäristötieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos. 58 s.
- Kebreab, E., Clark, K., Wagner-Riddle, C. & France, J. 2006. Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review. *Canadian Journal of Animal Science*, 86: 135–157.
- Kemppainen, E. 1992. Maanparannus ja maanparannusaineet. Teoksessa: Heinonen, R. (toim.), Hartikainen, H., Aura, E., Jaakkola, A. & Kemppainen, E. Maa, viljely ja ympäristö. Porvoo: WSOY. s. 295–300.
- Kesäniemi, O. 2009. Rahkaturvemaiden hydrauliset ominaisuudet. Vesitalouden ja vesirakennuksen lisensiaattityö. Teknillinen korkeakoulu, yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos. 144 s.
- Kirchmann, H. & Bergström, L. 2003. Use of Paper-mill Wastes on Agricultural Soils: Is This a Way to Reduce Nitrate Leaching?. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 53: 53–56.
- Kivinen, E. 1950. ”Suon” taipaleelle lähtiessä. Suo, 1. Suoseura, Helsinki. 1 s.
- Koga, N. & Tsuji, H. 2010. Effects of reduced tillage, crop residue management and manure application practices on crop yields and soil carbon sequestration on an Andisol in northern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55: 546–557.
- Kukkonen, S., Tammikari, M. & Tuomola, P. 2011. Decreasing phosphorus leaching and compaction of peat based growing media with clay, fiber clay and dark peat. *Acta horticulturae*, 891: 149–158.

- Kulmala, A. 2011. Teho-hankkeen raportteja, osa 1 — Tehoa maatalouden vesiensuojeluun. Teho-hankkeen julkaisuja 1/2011. Helsinki: Edita Prima Oy. 82 s.
- Kuokkanen, M., Tuomisto, J., Prokkola, H., Tervonen, P. & Lassi, U. 2019. The utilization of industrial by-products as soil conditioners and fertilizers in non-food potato production. *BioResources*, 14: 7299–7315.
- Kuokkanen, T., Nurmesniemi, H., Pöykiö, R., Kujala, K., Kaakinen, J. & Kuokkanen, M. 2008. Chemical and leaching properties of paper mill sludge. *Chemical Speciation & Bioavailability*, 20: 111–122.
- Kämäräinen, A., Simojoki, A., Lindén, L., Jokinen, K. & Silvan, N. 2018. Physical growing media characteristics of Sphagnum biomass dominated by *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr. *Mires and Peat*, 21: 1–16.
- Larmola, T., Tirola, M., Leppänen, S. M., Putkinen, A., Aarva, M., Merilä, P., Fritze, H. & Tuittila, E.-S. 2014. Metaanin hapettajat – suon hiilen ja typen kierron kaksoisagentit. *Metsätieteen aikakauskirja*, 4: 263–268.
- Lee, C. H., Ha, B. Y., Lee, Y. B. & Kim, P. J. 2009. Effect of alkalized phosphogypsum on soil chemical and biological properties. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40: 2072–2086.
- Letts, M. G., Roulet N. T., Comer, N. T., Skarupa, M. R. & Versegny, D. L. 2010. Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian land surface scheme. *Atmosphere-Ocean*, 38: 141–160.
- Lindroos, N., Ronkainen, M. & Järvinen, K. 2016. Metsä- ja energiateollisuuden jätejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. Ympäristöministeriön raportteja 8. Helsinki: Ympäristöministeriö. 106 s.
- Lindholm, T. & Vasander, H. 1983. Soista, soiden käytöstä ja suoekologisesta tutkimuksesta Karjalan ASNT:ssa. *Suo*, 34: 99–110.
- Linna, V. 2018. Täällä Pohjantähden alla. WSOY. 1174 s.
- Lohila, A., Aurela, M., Tuovinen, J.-P. & Laurila, T. Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage grass. *Journal of Geophysical Research*, 109. 13 s.
- Lohiniva, E., Mäkinen T. & Sipilä, K. 2001. Lietteiden käsittely. Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Tiedotteita. 146 s.

- Maa- ja metsätalousministeriö. 2015. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista annetun maa- ja metsätalousministeriön asetuksen muuttamisesta. Asetus 21/15.
- Machado, R. M. A. & Serralheiro, R. P. 2017. Soil Salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. *Horticulturae*, 3. 13 s.
- Madari, B., Machado, P. L. O. A., Torres, E., de Andrade, A. G. & Valencia, L. I. O. 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 80: 185–200.
- Maljanen, M., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Alm, J., Minkkinen, K., Laine, J. & Martikainen, P. 2007a. Viljeltyjen ja viljelemättömien turvepeltojen kasvihuonekaasupäästöt. Teoksessa: Turpeen ja turvemaiden käytön kasvihuonevaikutukset Suomessa – Tutkimusohjelman loppuraportti. Maa- ja metsätalousministeriö. 68 s.
- Maljanen, M., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Alm, J., Minkkinen, K., Laine, J. & Martikainen, P. J. 2007b. Greenhouse gas emissions from cultivated and abandoned organic croplands in Finland. *Boreal Environment Research*, 12: 133–140.
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P. J. 2003. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils. *Soil Use and Management*, 19: 73–79.
- Maljanen, M., Martikainen, P. J., Walden, J. & Silvola, J. 2001. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biology*, 7: 679–692.
- Marouani, E., Benzina, N. K., Ziadi, N., Bouslimi, B., Abida, K., Tlijani, H. & Koubaa, A. 2020. CO₂ emission and change in the fertility parameters of a calcareous soil following annual applications of deinking paper sludge (the case of Tunisia). *Agronomy*, 10. 18 s.
- Marshall, T. J., Holmes, J. W. ja Rose, C. W. 1996. Soil physics. 3. painos. Cambridge University Press. 456 s.
- Martikainen, P. J., Nykänen, H., Crill, P. & Silvola, J. 1993. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature*, 366: 51–53.
- Matilainen, M., Pisto, S., Rinnepelto, P. & Kinnunen, N. 2014. Metsäteollisuuden ravinteet - Metsäteollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen lannoitevalmisteina. Metsäteollisuuden ravinteet. Joensuu: Apila Group Oy Ab. 41 s.

- Mattila, T. J., Manka, V. & Rajala, J. 2019. Kipsi maanparannusaineena – Hyödyt ja haitat maan kasvukunnolle. Raportteja 192. Seinäjoki ja Mikkeli: Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. 30 s.
- Mattila, T. J., Manka, V., Rajala, J., Ajosenpää, H., Luokkakallio, J. & Tuononen, M. 2018. Kuinka maan kasvukuntaa kehitetään? Havaintoja kahdeksalta tilalta Varsinais-Suomesta, Satakunnasta ja Etelä-Pohjanmaalta. Raportteja 189. Seinäjoki ja Mikkeli: Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. 56 s.
- Melero, S., Madejón, E., Ruiz, J. C. & Herencia, J. F. 2007. Chemical and biochemical properties of a clay soil under dryland agriculture system as affected by organic fertilization. *European Journal of Agronomy*, 26: 327–334.
- Metsä Tissue. 2020. Tuotannon sivutuotteet. Internetlähde: <https://www.metsatissue.com/en/AboutUs/Operations-in-Finland/Suomi/tuotannon-sivutuotteet/Pages/default.aspx>. Viitattu 16.9.2020.
- Michel, J-C., Riviere, L-M. & Bellon-Fontaine, M-N. 1999. Effects of water content on the wettability of peats. *Écologie*, 30: 13–17.
- Mustamo, P., Hyvärinen, M., Ronkanen, A.-K. & Kløve, B. 2016. Physical properties of peat soils under different land use options. *Soil Use and Management*, 32: 400–410.
- Myllys, M. 1998. Soiden viljely. Teoksessa: Korhonen, R., Aapala, K., Laine, J., Myllys, M., Ruuhijärvi, R., Sopo, R & Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Helsinki: Suoseura ry. s. 64–71.
- Myllys, M. & Sinkkonen, M. 2004. Viljeltyjen turve- ja multamaiden pinta-ala ja alueellinen jakauma Suomessa. *Suo*, 55: 53–60.
- Myllys, M. & Soini, S. 2008. Suot maanviljelyssä. Teoksessa: Korhonen, R., Korpela, L., & Sarkkola, S. (toim.). Suomi – Suomaa: Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö. Suoseura ry ja Maahenki Oy. s. 93–95.
- Nayak, S., Mishra, C. S. K., Guru, B. C. & Rath, M. 2011. Effect of phosphogypsum amendment on soil physico-chemical properties, microbial load and enzyme activities. *Journal of Environmental Biology*, 32: 613–617
- Nemati, M. R., Caron, J. & Gallichand, J. 2000a. Using paper de-inking sludge to maintain soil structural form: field measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 275–285.

- Nemati, M. R., Caron, J. & Gallichand, J. 2000b. Stability of structural form during infiltration: laboratory measurements on the effect of de-inking sludge. *Soil Science Society of America Journal*, 64: 543–552.
- Norrie, J. & Gosselin, A. 1996. Paper sludge amendments for turfgrass. *HortScience*, 31: 957–960.
- Nykänen, H., Alm, J., Lång, K., Silvola, J. & Martikainen, P. J. 1995. Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland. *Journal of Biogeography*, 22: 351–357.
- Nystrand, M. I. & Österholm, P. 2013. Metal species in a Boreal river system affected by acid sulfate soils. *Applied Geochemistry*, 31: 133–141.
- Oades, J. M. 1988. The retention of organic matter in soils. *Biochemistry*, 5: 35–70.
- Ojanen, P. 2001. Sellu- ja paperitehtaiden lietteiden käsittely ja hyötykäyttö sekä niitä rajoittavat tekijät. Alueelliset ympäristöjulkaisut, 223. Kouvola, Kaakkois-Suomen ympäristökeskus. 65 s.
- Ollikainen, M., Ekholm, P., Puntila, E., Ala-Harja, V., Riihimäki, J., Puroila, S., Kosenius, A-K. & Iho, A. 2018. Peltojen kipsikäsittely maatalouden vesiensuojelukeinona. Helsingin yliopisto ja Suomen ympäristökeskus. 12 s.
- Okruszko, H. 1993. Transformation of fen-peat soils under the impact of draining. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 406: 3–73.
- Oleszczuk, R. & Brandyk, T. 2008. The analysis of shrinkage-swelling behaviour of peat-moorsh soil aggregates during drying-wetting cycles. *Agronomy Research*, 6: 131–140.
- Paasonen-Kivekäs, M. 2016. Typpi. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltonen, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys. s. 191–204.
- Passioura, J. B. 1991. Soil structure and plant growth. *Australian Journal of Soil Research*, 29: 717–728.
- Peltomaa, R. 2016. Salaojitus. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltonen, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys. s. 283–336.
- Pessi, Y. 1958. On the influence of bog draining upon thermal conditions in the soil and in the air near the ground. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 8: 359–374.

- Pessi, Y. 1959a. On the effect of liming upon the thermal condition of sphagnum bog. *Suo*, 10: 46–49.
- Pessi, Y. 1959b. Rahkasuon maanparannuksen merkityksestä. *Suo*, 10: 79–82.
- Pessi, Y. 1966. Suon viljely. Porvoo: WSOY. 138 s.
- Päivänen, J. 1973. Hydraulic conductivity and water retention in peat soils. *Acta Forestalia Fennica*, 129. 70 s.
- Pöykiö, R., Nurmesniemi, H. & Kuokkanen, T. 2009. Kuitusavi – jätteiden ekotehokkaan hyödyntämisen lippulaiva. *Kuntatekniikka*, 1: 55–57.
- Ramboll. 2008. Hiekkakenttien ylläpitäjän ja perusparantajan opas. 17 s.
- Rietz, D. N. & Haynes, R. J. 2003. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*, 35: 845–854.
- Ritter, W. F., McDermott, J. G. & Chirnside, A. E. M. 1992. Use of paper mill residuals as soil amendments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 23: 269–488.
- Ronkanen, A-K. & Kløve, B. 2005. Hydraulic soil properties of peatlands treating municipal wastewater and peat harvesting runoff. *Suo*, 56: 43–56.
- Ruokavirasto. 2020. Haitalliset aineet. Internetlähde: <https://www.ruokavirasto.fi/yritykset/rehu--ja-lannoiteala/lannoitevalmisteet/laatuvaatimukset/haitalliset-aineet-ja-hygienia/>. Viitattu 13.1.2020.
- Samal, S., Sahoo, S. & Mishra, C. S. K. 2017. Morpho-histological and enzymatic alterations in earthworms *Drawida willsi* and *Lampito mauritii* exposed to urea, phosphogypsum and paper mill sludge. *Chemistry and Ecology*, 33: 762–776.
- Sarasto, J. 1961. Kokeita turpeen vedenläpäisevyydestä. *Suo*, 12: 24–25.
- Sarasto, J. 1963. Tutkimuksia rahka- ja saraturpeiden vedenläpäisevyydestä. *Suo*, 14: 32–36.
- Schothorst, C. J. 1977. Subsidence of low moor peat soils in the Western Netherlands. *Geoderma*, 17: 265–291.
- Senbayram, M., Chen, R., Budai, A., Bakken, L. & Dittert, K. 2012. N₂O emission and the N₂O/(N₂O+N₂) product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 147: 4–12.
- Shen, Y-H. 1999. Sorption of natural dissolved organic matter on soil. *Chemosphere*, 38: 1505–1515.

- Sihvonen, M. 2014. Turpeen ilmastovaikutus: Turpeen tehollinen päästökerroin ja yhteiskunnan kannalta optimaalinen polttoainekäyttö. Ympäristöekonomian pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, taloustieteen laitos. 110 s.
- Simard, R. R., Baziramakenga, R., Yelle, S. & Coulombe, J. 1998. Effects of de-inking paper sludges on soil properties and crop yields. *Canadian Journal of Soil Science*, 78: 689–697.
- Sitaula, B. K., Hansen, S., Sitaula, J. I. B. & Bakken, L. R. 2000. Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. *Chemosphere — Global Change Science*, 2: 367–371.
- Sitra. 2016. Kierrolla kärkeen — Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016–2025. Sitran selvityksiä 177. 56 s.
- Sitra. 2019. Kriittinen siirto — Suomen kiertotalouden tiekartta 2.0 tiivistelmä. Internetlähde <https://media.sitra.fi/2019/03/12220104/kiertotalouden-tiekartta-tiivistelma-fi.pdf>. Viitattu 5.10.2020.
- Steudler, P. A., Bowden, R. D., Melillo, J. M. & Aber, J. D. 1989. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 341: 314–316.
- Stevens, R. J., Laughlin, R. J. & Malone, J. P. 1998. Soil pH affects the processes reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 30: 1119–1126.
- Strawn, D. G., Bohn, H. L. & O'Connor, G. A. 2015. *Soil Chemistry*. John Wiley & Sons. 381 s.
- Syed-Omar, S. R. & Sumner, M. E. 2008. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfalfa. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 22: 2017–2028.
- Teh, Y. A., Silver, W. L., Sonnentag, O., Detto, M., Kelly, M. & Baldocchi, D. D. 2011. Large greenhouse gas emissions from a temperate peatland pasture. *Ecosystems*, 14: 311–325.
- Tilastokeskus. 2020. Suomen kasvihuone-kaasupäästöt 1990–2019. Helsinki. 83 s.
- Tisdall, J. M. & Oades, J. M. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141–163.
- Trépanier, L., Gallichand, J., Caron, J. & Thériault, G. 1996. Environmental impact of on-farm storage of deinking paper mill sludge. *American Society of Agricultural Engineers*, 39: 1853–1859.
- Tuomisto, J. 2013. Maan rakenne osana perunamaan tuottavuutta ja ympäristöhoitoa. *Tuottava Peruna*, 3: 24–25.

- Tuomisto, J. 2017. Käytöstä poistuneet turvesuot non food -perunatuotantoon. Tuottava peruna, 4: 12–13.
- Vakkilainen, P. Hydrologian perusteita. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltonen, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys. s. 73–127.
- VN 2011. Jätelaki. Asetus 646/2011. Annettu 17.6.2011. Finlex® sähköinen säädöstietopankki: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>. Viitattu 5.10.2020.
- van Duin, R. H. A. 1963. The influence of soil management on the temperature wave near the soil surface. Technical Bulletin, 29. 21 s.
- Viljavuuspalvelu. 2008. Viljavuuspalvelun tulkinta peltoviljelyssä. Mikkeli: Viljavuuspalvelu. 8 s.
- Virkajärvi, P. & Huhta, H. 1998. Turvetuotannosta vapautuneiden suopohjien maatalouskäyttöön otto. Teoksessa: Korhonen, R., Aapala, K., Laine, J., Myllys, M., Ruuhijärvi, R., Sopo, R. & Vasander, H. (toim.). Suomen suot. Helsinki: Suoseura ry. s. 135–137.
- Virolainen, P. 2017. Metsäteollisuudessa syntyvien biohajoavien jätteiden hyötykäyttötilanne ja -mahdollisuudet. Raportteja 54. Kaakkois-Suomen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. 45 s.
- Virtanen, K., Hänninen, P., Kallinen, R.-L., Vartiainen, S., Herranen, T. & Jokisaari, R. 2003. Suomen turvevarat 2000. Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 156. 111 s.
- Voundi Nkana, J. C., Tack, F. M. G. & Verloo, M. G. 1998. Paper pulp as an amendment to a tropical acid soil: Effects on growth of rye grass. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 29: 1329–1340.
- West, T. O. & Marland, G. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. Agriculture, Ecosystems and Environment, 91: 217–232.
- Whittinghill, K. A. & Hobbie, S. E. 2012. Effects of pH and calcium on soil organic matter dynamics in Alaskan tundra. Biochemistry, 111: 569–581.
- Yli-Halla, M. & Hartikainen, H. 1996. Release of soil phosphorus during runoff as affected by ionic strength and temperature. Agricultural and Food Science in Finland, 5: 193–202.
- Ympäristöministeriö. 2018. Orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon soveltaminen. 23 s.

- Zhang, Q., Wang, Y., Wu, Y., Wang, X., Du, Z., Liu, X. & Song, J. 2013. Effects of biochar amendment on soil thermal conductivity, reflectance, and temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 77: 1478–1487.
- Zhu, B. & Alva, K. 1994. The effect of gypsum amendment on transport of phosphorus in a sandy soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 78: 375-382.
- Zoca, S. M. & Penn, C. 2017. Chapter One - An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. *Advances in Agronomy*, 144: